

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

**Metoda výpočtu teoretické kapacity
vzletové a přistávací dráhy**

Method of runway theoretical capacity
calculation

Student:

Bc. Radek Matoušek

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Michal Dorda, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Radek Matoušek**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie
Specializace: 40 Letecká doprava
Téma: **Metoda výpočtu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy**
Method of Runway Theoretical Capacity Calculation

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cíl práce: Modifikovat metodu výpočtu propustné výkonnosti mezistaničních úseků ve stochastických podmínkách pro potřeby výpočtu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy a na příkladech tuto upravenou metodu aplikovat.

Předpokládaná osnova práce:

1. Úvod.
2. Teoretická východiska pro řešení práce.
3. Návrh metody výpočtu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy.
4. Aplikace navržené metody na příkladech.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

DANĚK, J., TEICHMANN, D.: *Technologie dopravy IV*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2003. ISBN 80-248-0490-5.

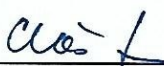
HAVEL, K., KULČÁK, L.: *Řízení letové provozu*. Bratislava: ALFA, 1990. ISBN 80-05-00401-X.
Letecké předpisy L.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Michal Dorda, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20.5.2019



podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20.5. 2019.....

.....


podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Radek Matoušek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Vratimovská 417, Vratimov 739 32

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MATOUŠEK, R. *Metoda výpočtu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2019, 85 s. Vedoucí práce: Dorda, M.

Diplomová práce se zabývá aplikací metody výpočtu propustné výkonnosti v železniční dopravě pro výpočet teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy. První část práce je zaměřena na popis metody propustné výkonnosti, jevu turbulence v úplavu a s ním související kategorie letounů a rozstupů mezi nimi. V neposlední řadě je v této části popsán návrh metody výpočtu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy. Další část diplomové práce se věnuje popisu letiště Leoše Janáčka Ostrava, na kterém probíhalo měření jednotlivých časů vzletů a přistání letouny. Tyto časy jsou statisticky zpracovány a poté využity pro stanovení teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy na tomto letišti. V poslední části práce dochází ke srovnání výsledků dosažených navrženou metodou v této práci s výsledky dosaženými v bakalářské práci – Modelování zadaného leteckého procesu, která se rovněž věnovala výpočtu maximální teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy na letišti Leoše Janáčka Ostrava. Dále se v této kapitole porovnávají výsledky dosažené navrženou metodou na reálném souboru naměřených časů s výsledky experimentálního příkladu.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

MATOUŠEK, R. *Method of runway theoretical capacity calculation: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of transport, 2019, 85 p. Thesis head: Dorda, M.

The master thesis deals with the application of capacity calculation in railway transport for the calculation of the theoretical capacity of the runway. The first part is focused on the description of capacity calculation in railway transport, the phenomenon of wake turbulence and the related categories of airplanes and the separation between them. Also, this part describes the method of calculation of theoretical capacity of the runway. The next part of the master thesis deals with the description of Leoš Janáček Airport, where the individual times of take offs or landings were measured. These times are statistically processed and then used to determine the theoretical runway capacity at that airport. In the last part of the thesis there is a comparison of the results achieved by proposed method in this work with results achieved in the bachelor thesis – Selected Aircraft Process Modeling which was also devoted to the calculation of maximum theoretical capacity of the runway at Leoš Janáček Airport. Furthermore, this chapter compares the results achieved by the proposed method on a real set of measured times with the results of an experimental example.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	8
Úvod	12
1 Teoretická východiska pro řešení práce	14
1.1 Propustná výkonnost obousměrně pojížděné traťové koleje	15
1.2 Řešený příklad	20
2 Návrh metody výpočtu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy	26
2.1 Turbulence v úplavu	26
2.2 Rozstupy letounů dle kategorie turbulence v úplavu.....	28
2.2.1 Přistávající letouny	28
2.2.2 Vzlétávající letouny	29
2.2.3 Posunutý práh dráhy pro přistání.....	30
2.2.4 Opačný směr vzletu	31
2.2.5 Rozstupy založené na vzdálenosti	31
2.3 Koncept výpočtu teoretické kapacity	32
2.4 Čas pravidelných kontrol.....	41
3 Aplikace navržené metody	42
3.1 Letiště Leoše Janáčka Ostrava.....	42
3.2 Naměřené doby vzletů a přistání	43
3.3 Statistické zpracování naměřených dat.....	44
4 Výpočet teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy	50
5 Porovnání	58
5.1 Statistické porovnání	58
5.2 Provozní charakteristiky	59
5.3 Srovnání intenzity vstupního toku a teoretické kapacity	61
5.4 Experimentální výpočty.....	62
6 Závěr.....	68



Seznam použité literatury	72
Seznam obrázků, tabulek a grafů.....	73
Seznam příloh.....	Chyba! Záložka není definována.

Seznam použitých značek a symbolů

Pro železniční část diplomové práce

+	sudý směr příjezdu vlaku	
-	lichý směr příjezdu vlaku	
$h(i^S, j^S)$	četnosti jednotlivých druhů sledů vlaků	[-]
n_p	propustná výkonnost	[pv]
N	počet všech vlaků za výpočetní období	[-]
N_i^S	počet vlaků typu i (osobní, nákladní, rychlík, ...), které jedou ze sudého (značeno +) nebo lichého (značeno -) směru	[-]
N_j^S	počet vlaků typu j (osobní, nákladní, rychlík, ...), které jedou ze sudého (značeno +) nebo lichého (značeno -) směru	[-]
Os	osobní vlak	
$p(i^S, j^S)$	pravděpodobnosti jednotlivých druhů sledů vlaků	[-]
R	vlak typu rychlík	
$\overline{t_{obs}}$	průměrný čas obsazení mezistaničního úseku jedním průměrným vlakem	[min]
T	výpočetní čas	[min]
T_{obs}	celkový nejkratší čas obsazení traťové koleje všemi druhy sledů vlaků	[min]
$T_{stál}$	čas stálých manipulací	[min]
$T_{výl}$	čas pravidelných výluk	[min]
\bar{z}	skutečná průměrná záloha připadající na jeden průměrný vlak	[min]
z_{min}	minimální časová záloha	[min]
τ_k	interval křižování	[min]
τ_{nj}^{RV}	interval následné jízdy	[min]
τ_{nj}^{PV}	interval následné jízdy	[min]

τ_r	přirážka na rozjezd vlaku osobní přepravy	[min]
τ_{pv}	interval postupných vjezdů	[min]
τ_{ss}	nejkratší čas obsazení obousměrně pojižděné trati	[min]
τ_z	přirážka na zastavení vlaku osobní přepravy	[min]

Pro leteckou část diplomové práce

+	manévr přistání	
-	manévr vzletu	
ATC	stanoviště řízení letového provozu	
C	teoretická kapacita vzletové a přistávací dráhy	[s]
$h(i_s, j_s)$	četnosti jednotlivých druhů sledů letounů	[-]
H	letoun kategorie heavy dle turbulence v úplavu, značeno také jako HEAVY	
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví	
ILS	systém přesného přístrojového přiblížení na přistání	
J	letoun kategorie jumbo dle turbulence v úplavu, značeno také jako SUPER	
K_{i-j}^{SS}	časový rozstup dle kategorie turbulence v úplavu mezi daným druhem sledu letounů, které provádí manévr přistání	[s]
L	letoun kategorie light dle turbulence v úplavu, značeno také jako LIGHT	
LKMT	ICAO kód letiště Leoše Janáčka Ostrava	
M	letoun kategorie medium dle turbulence v úplavu, značeno také jako MEDIUM	
n	rozsah souboru	[-]
N	počet všech letounů za výpočetní čas	[-]

N_S^i	počet vlaků kategorie i (osobní, nákladní, rychlík, ...), které jedou v sudém (značeno +) nebo lichém (značeno -) směru	[-]
N_S^j	počet vlaků kategorie j (osobní, nákladní, rychlík, ...), které jedou v sudém (značeno +) nebo lichém (značeno -) směru	[-]
OSR	IATA kód letiště Leoše Janáčka Ostrava	
$p(i_S, j_S)$	pravděpodobnosti jednotlivých druhů sledů letounů	[-]
R	variační rozpětí	[s]
s^2	výběrový rozptyl	[s ²]
s	výběrová směrodatná odchylka	[s]
t_i^S	čas manévru každého letounu kategorie i (light, medium, heavy, super), které buď provádí manévr vzletu nebo manévr přistání	[s]
$\overline{t_{obs}}$	průměrný čas obsazení vzletové a přistávací dráhy jedním sledem letounů	[s]
T	výpočetní čas	[s]
T_{ctrl}	čas pravidelných control	[s]
T_i^S	průměrný čas manévru ze všech letounů kategorie i (light, medium, heavy, super), které buď provádí manévr vzletu (značeno -) nebo manévr přistání (značeno +)	[s]
T_j^S	průměrný čas manévru ze všech letounů kategorie j (light, medium, heavy, super), které buď provádí manévr vzletu (značeno -) nebo manévr přistání (značeno +)	[s]
T_{obs}	celkový nejkratší čas obsazení vzletové a přistávací dráhy všemi druhy sledů letounů	[s]
v_{max}	maximální hodnota proměnné	[s]
v_{min}	minimální hodnota proměnné	[s]
\bar{x}	aritmetický průměr	[s]

x_i	prvek náhodného výběru	[s]
\bar{z}	skutečná průměrná záloha připadající na jeden letoun	[s]
z_{min}	minimální časová záloha	[s]
τ_{i-j}^{SS}	jednotkový nejkratší čas obsazení vzletové a přistávací dráhy daným druhem sledu letounů, které buď provádí manévr vzletu (značeno -) nebo manévr přistání (značeno +)	[s]

Úvod

V dnešní době se letecká doprava stala běžnou součástí lidského života, aniž bychom si tento fakt uvědomovali a vnímali ho v tak velkém měřítku. Díky tomuto druhu přepravy osob a zboží jsme schopni přepravovat, přijímat nebo zasílat zboží na velmi dlouhé vzdálenosti za krátkou dobu.

Avšak s rostoucím rozvojem letecké dopravy se frekventovaná letiště často stávají vysoce zatížená letovým provozem. Proto je nutné již před plánovaným provozem letiště stanovit maximální kapacitu vzletové a přistávací dráhy na daném letišti, aby se předešlo případným zdržením nebo nevynuceným časovým prostoje, při zachování bezpečnosti přepravy osob a zboží.

Cíl práce

Cílem této diplomové práce je modifikovat metodu výpočtu propustné výkonnosti mezistaničních úseků ve stochastických podmínkách pro potřeby výpočtu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy a na příkladech tuto upravenou metodu aplikovat.

Struktura práce

Diplomová se skládá z teoretické části, která je zaměřena na popis teoretických východisek pro řešení této práce, a praktické části, která se skládá z návrhu metody pro výpočet teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy a aplikací této metody na naměřený soubor hodnot vzletů a přistání jednotlivých letounů.

V druhé kapitole této práce je popsána metoda výpočtu propustné výkonnosti obousměrně pojížděné traťové koleje, která vznikla pro podmínky železniční dopravy. Pro lepší pochopení problematiky je zde uveden jeden řešený příklad z železniční dopravy.

Třetí kapitola je věnována návrhu metody pro výpočet teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy. Jsou zde aplikovány postupy pro výpočet propustné výkonnosti u železniční dopravy. V této kapitole je také zpracována problematika rozstupů mezi letouny podle kategorie turbulence v úplavu, která je následně použita pro další výpočty. Dále kapitola obsahuje časy pravidelných kontrol vzletové a přistávací dráhy v letecké dopravě spojené s problematikou výpočtu kapacity vzletové a přistávací dráhy.

Ve čtvrté kapitole je základně popsáno letiště Leoše Janáčka v Ostravě, na kterém probíhalo měření potřebných časů vzletů a přistání jednotlivých letounů. Tento soubor naměřených hodnot je v dané kapitole statisticky zpracován a vyhodnocen.

V pořadí pátá kapitola jednotlivé kroky výpočtu vedoucí k určení teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy vztahmo k naměřenému souboru dat a modifikované metodě propustné výkonnosti železniční dopravy.

V šesté kapitole dochází ke srovnání výsledků dosažených v bakalářské práci na téma Modelování zadaného leteckého procesu a této diplomové práce. Porovnávají se hlavně statistické veličiny, které byly vypočteny na základě rozdílného naměřeného souboru dat v každé z prací. Dále je zde popsáno porovnání závislosti intenzity vstupního toku na střední době čekání ve frontě s teoretickou kapacitou vzletové a přistávací dráhy, která byla zjištěna v diplomové práci. Poslední část této kapitoly obsahuje srovnání výsledků dosažených v této práci pro daný naměřený soubor časů s experimentálními výpočty využívající stejnou metodu výpočtu a zjištěné poznatky z předchozích výpočtů.

Poslední závěrečná kapitola je věnována rekapitulaci navržené metody pro výpočet teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy, výsledkům zjištěným pomocí této navržené metody a celé diplomové práce.

1 Teoretická východiska pro řešení práce

Pro zpracování této kapitoly byl použit zdroj [1].

Pro potřeby popsání metod výpočtu maximální propustné výkonnosti je nutné vysvětlit pojem grafikon dopravy. Grafikon vlakové dopravy je grafické znázornění pohybu vlaků na dané trase. Jednotlivé vlaky lze znázornit jako lomené čáry nebo úsečky. Na vodorovné ose grafikonu je znázorněn čas a svislá osa identifikuje vzdálenost mezi danými místy například stanicemi nebo zastávkami. Jízda jedním směrem se znázorňuje šikmou čarou, která směřuje doprava nahoru na grafu a jízda v opačném směru se značí šikmou čarou směřující doprava dolů. Rychlost příslušného vlaku reprezentuje sklon příslušné čáry. Čím je sklon čáry strmější, tím je rychlost vlaku větší.

V současnosti se pro výpočet maximální propustné výkonnosti používají tři metody, a to grafická metoda, analytická metoda nebo kombinace těchto dvou metod.

Řešení pomocí grafické metody spočívá ve vytvoření grafikonu práce daného prvku. Touto metodou lze poměrně přesně určit maximální propustnou výkonnost, nicméně metoda je velice pracná z důvodu nutnosti znázornění obsazení jednotlivými vlaky. Pokud se vyšetřuje maximální propustná výkonnost traťového úseku pomocí grafické metody, je potřeba vytvořit grafikony vlakové dopravy a grafikony práce všech ostatních provozních zařízení. Poté musí být splněna podmínka, že grafikony musí být uváděny ve vzájemném souladu a také je nutno brát ohled na provoz ostatních přilehlých traťových úseků.

Analytický způsob řešení využívá k určení maximální propustné výkonnosti průměrné a rovnoměrné obsazení daného prvku. Tento způsob výpočtu je méně přesný než řešení pomocí grafické metody, avšak je také méně náročný na zpracování.

Kombinací těchto dvou řešení je takzvaný grafickoanalytický způsob výpočtu. Tato metoda využívá grafický způsob řešení pro prvky se složitějšími provozními poměry a pro prvky, které mají jednodušší provozní poměry, využije analytický způsob řešení.

V této diplomové práci bude k výpočtu maximální propustnosti využit analytický způsob výpočtu.

1.1 Propustná výkonnost obousměrně pojížděné traťové koleje

Pro zpracování kapitoly 2.1 byl použit zdroj [1].

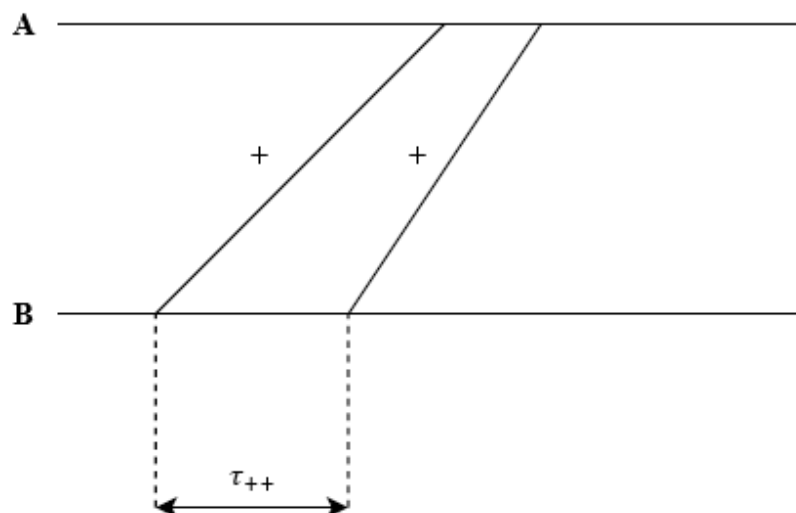
Propustnou výkonnost lze definovat jako kapacitní možnosti železničních tratí. Tuto veličinu je možné vypočítat jak v deterministických podmínkách, tak i ve stochastických podmínkách, ale tato diplomová práce je zaměřena na výpočet maximální propustné výkonnosti pouze ve stochastických podmínkách, což znamená, že časové veličiny mohou mít charakter náhodných proměnných. Důvodem je, že jak na železnici, tak ale i v letectví se velká část provozu uskutečňuje právě ve stochastických podmínkách, protože vlivem vnějších i vnitřních příčin dochází k odchylkám proti plánům. Proto se v praxi přidává k časovým plánům i určitá časová rezerva, přičemž čím větší je tato časová rezerva, tím menší je pravděpodobnost přenosu zpoždění na další spoje a naopak.

Dále uvedený způsob výpočtu propustné výkonnosti lze využít hlavně při výpočtech výhledového charakteru. Například pro posouzení, zda daný úsek zvládne pojmout daný rozsah dopravy, který se na něm má realizovat.

Obousměrně pojížděné traťové koleje se vyskytují zpravidla na jednokolejných tratích, avšak lze je nalézt i u dvukolejných a vícekelejných tratí. Při výpočtu je nutné rozlišovat vlaky nejen podle druhu (rychlík, osobní, nákladní), ale také podle směru jízdy. Pokud vlak přijíždí ze sudého směru, je označen znaménkem +, a pokud vlak přijíždí z lichého směru, je označen znaménkem -. Tím, že se v tomto případě vyskytují různé druhy vlaků, které přijíždějí z různých směrů, vkládají se tyto trasy tak, aby realizace grafikonu probíhala co nejvíce plynule a bezpečně. K výpočtu maximální propustné výkonnosti je nutné znát:

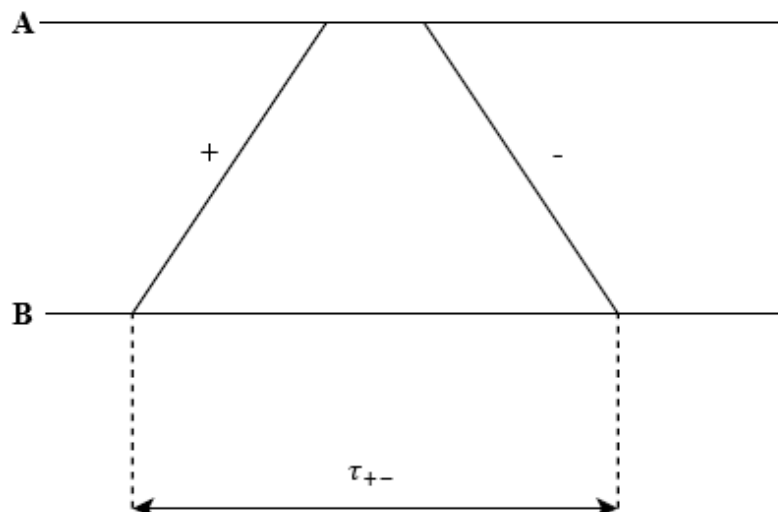
- rozsah vlakové dopravy podle jednotlivých kategorií vlaků,
- předpokládané pravidelné jízdní doby,
- provozní intervaly a následná mezidobí,
- minimální hodnotu záložního času,
- výpočetní čas, čas stálých manipulací, příp. pravidelných výluk.

Při řešení maximální propustné výkonnosti obousměrně pojížděné tratě nastanou čtyři druhy nejkratších časů obsazení. Prvním druhem je jízda prvního vlaku v sudém směru a jízda druhého vlaku taktéž v sudém směru. Nejkratší čas obsazení obousměrně pojížděné trati se v tom případě značí τ_{++} .



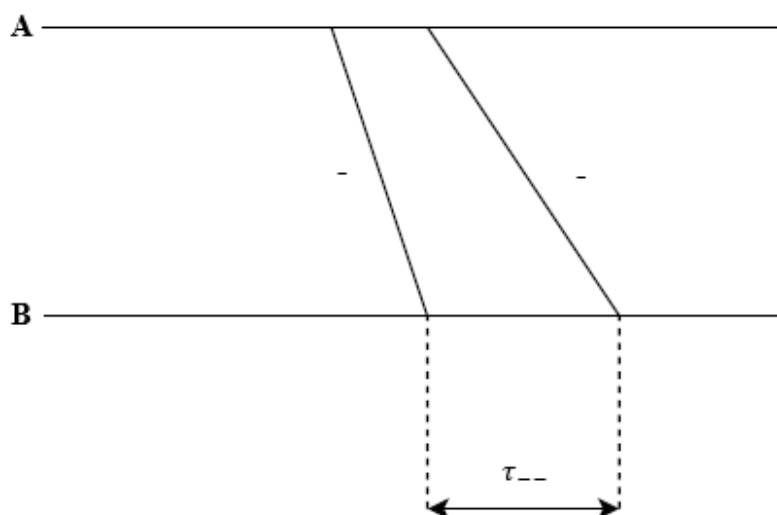
Obrázek 1 - Jízda prvního vlaku v sudém směru a jízda následujícího vlaku v sudém směru

Dalším způsobem je jízda prvního vlaku v sudém směru a jízda následujícího vlaku v lichém směru. V tomto případě se nejkratší čas obsazení obousměrně pojížděné trati označuje τ_{+-} .



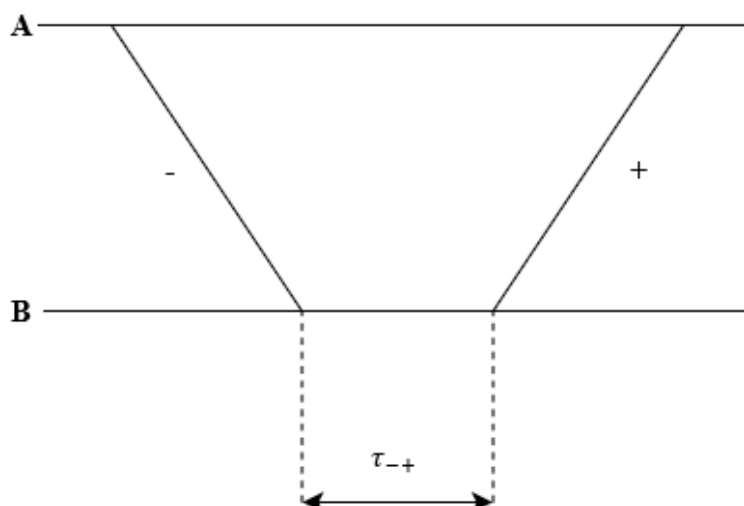
Obrázek 2 - Jízda prvního vlaku v sudém směru a jízda následujícího vlaku v lichém směru

Třetím způsobem je jízda prvního vlaku v lichém směru a následující jízda druhého vlaku taktéž v lichém směru. U tohoto případu se nejkratší čas obsazení obousměrně pojížděné trati označuje τ_{--} .



Obrázek 3 - Jízda prvního vlaku v lichém směru a jízda následujícího vlaku v lichém směru

Posledním způsobem nejkratšího času obsazení obousměrně pojížděné trati je jízda prvního vlaku v lichém směru a navazujícího druhého vlaku v sudém směru. Zde se nejkratší čas obsazení obousměrně pojížděné trati označuje τ_{-+} .



Obrázek 4 - Jízda prvního vlaku v lichém směru a jízda následujícího vlaku v sudém směru

Pro samotný výpočet průměrného času obsazení mezistaničního úseku jedním průměrným vlakem $\overline{t_{obs}}$ je nutné vypočítat:

- pravděpodobnosti jednotlivých druhů sledů vlaků,
- četnosti jednotlivých druhů sledů vlaků,
- nejkratší čas obsazení traťové koleje jednotlivými druhy sledů,
- celkový nejkratší čas obsazení traťové koleje všemi druhy sledů vlaků T_{obs} ,
- průměrný čas obsazení traťové koleje jedním vlakem,
- skutečnou průměrnou zálohu připadající na jeden vlak.

Pravděpodobnosti jednotlivých druhů sledů vlaků za předpokladu nezávislosti lze vypočítat vztahem:

$$p(i_S, j_S) = \frac{N_S^i \cdot N_S^j}{N^2}, \quad (1.1)$$

kde:

$p(i_S, j_S)$... pravděpodobnosti jednotlivých druhů sledů vlaků [-],

N_S^i ... počet vlaků kategorie i (osobní, nákladní, rychlík, ...), které jedou v sudém (značeno +) nebo lichém (značeno -) směru [-],

N_S^j ... počet vlaků kategorie j (osobní, nákladní, rychlík, ...), které jedou v sudém (značeno +) nebo lichém (značeno -) směru [-],

N ... počet všech vlaků za výpočetní období [-].

Četnosti jednotlivých druhů sledů vlaků lze získat pomocí vztahu:

$$h(i_S, j_S) = N \cdot p(i_S, j_S) = \frac{N_S^i \cdot N_S^j}{N}, \quad (1.2)$$

kde:

$h(i_S, j_S)$... četnosti jednotlivých druhů sledů vlaků [-],

N_S^i ... počet vlaků kategorie i (osobní, nákladní, rychlík, ...), které jedou v sudém (značeno +) nebo lichém (značeno -) směru [-],

N_S^j ... počet vlaků kategorie j (osobní, nákladní, rychlík, ...), které jedou v sudém (značeno +) nebo lichém (značeno -) směru [-],

N ... počet všech vlaků za výpočetní období [-].

Hodnota celkového času obsazení všemi sledy se řeší tabelárně, přičemž celkový nejkratší čas obsazení všemi sledy daného druhu lze získat jako součin četnosti výskytu daného druhu sledu a jednotkového nejkratšího času obsazení traťové koleje tímto druhem sledu.

Tabulka 1 - Výpočet celkového nejkratšího času obsazení všemi sledy daného druhu

Četnost výskytu sledu	
Jednotkový nejkratší čas obsazení daným druhem sledu	Celkový nejkratší čas obsazení všemi sledy daného druhu

Průměrný čas obsazení traťové koleje jedním vlakem lze vypočítat vztahem:

$$\overline{t_{obs}} = \frac{T_{obs}}{N}, \quad (1.3)$$

kde:

$\overline{t_{obs}}$... průměrný čas obsazení traťové koleje jedním vlakem [min],

T_{obs} ... celkový nejkratší čas obsazení všemi sledy všech druhů [min],

N ... počet všech vlaků za výpočetní období [-].

Skutečná průměrná záloha připadající na jeden průměrný vlak je dána vztahem:

$$\overline{z} = \frac{T - (T_{výl} + T_{stál} + T_{obs})}{N}, \quad (1.4)$$

kde:

\overline{z} ... skutečná průměrná záloha připadající na jeden vlak [min],

$T_{výl}$... čas pravidelných výluk [min],

$T_{stál}$... čas stálých manipulací [min],

T_{obs} ... celkový nejkratší čas obsazení všemi sledy daného druhu [min],

N ... počet všech vlaků za výpočetní období [-].

Podmínkou stanovení propustné výkonnosti je, aby skutečná průměrná záloha připadající na jeden vlak byla větší než minimální časová záloha. Pokud je toto splněno, tak je možné postoupit k výpočtu propustné výkonnosti, pokud tato podmínka není splněna, tak výpočet končí konstatováním, že za daných podmínek nelze bez dalších opatření požadovaný rozsah vlakové dopravy realizovat. Hodnota propustné výkonnosti se zaokrouhluje dolů na nejbližší celé číslo.

$$\overline{z} > z_{min} \quad (1.5)$$

Propustná výkonnost obousměrně pojížděné tratě je stanovena vztahem:

$$n_p = \frac{T - (T_{vyl} + T_{stál})}{\overline{t_{obs}} + z_{min}}, \quad (1.6)$$

kde:

n_p ... propustná výkonnost [pv],

T ... výpočetní čas [min],

T_{vyl} ... čas pravidelných výluk [min],

$T_{stál}$... čas stálých manipulací [min],

$\overline{t_{obs}}$... průměrný čas obsazení traťové koleje jedním vlakem [min],

z_{min} ... minimální časová záloha [min].

1.2 Řešený příklad

Pro lepší přehlednost a pochopení dané problematiky je zde uveden jeden zjednodušený řešený příklad, ve kterém bude vypočítaná propustná výkonnost obousměrně pojížděné tratové koleje. V tomto mezistaničním úseku jsou vedeny trasy rychlíků a osobních vlaků. Rychlíky ve stanicích nezastavují a projíždějí je, nicméně osobní vlaky v obou stanicích zastavují. Podmínka, že rychlíky ve stanicích nezastavují je splněna v případě, že není jejich zastavení nutné z dopravních důvodů. Rozsah vlakové dopravy je znázorněn v tabulce č. 2.

Tabulka 2 - Rozsah vlakové dopravy

Druh vlaku	Počet vlaků za výpočetní čas		Pravidelné jízdní doby
	+ (sudý směr)	- (lichý směr)	
Rychlík (R)	3	2	6
Osobní vlak (Os)	6	8	10
Σ	9	10	-
	19		

Také je nutné započítat příslušné provozní intervaly pro obě stanice a přírážky na rozjezd a zastavení u vlaků osobní přepravy.

Přirážka na rozjezd vlaku osobní přepravy $\tau_r = 1$ min.

Přirážka na zastavení vlaku osobní přepravy $\tau_z = 1$ min.

Interval křižování $\tau_k = 2$ min.

Interval postupných vjezdů $\tau_{pv} = 4$ min.

Intervaly následné jízdy $\tau_{nj}^{PV} = 3$ min a $\tau_{nj}^{RV} = 1$ min, kde PV je pro projíždějící vlak a RV pro rozjíždějící vlak.

Minimální hodnota záložního času je určena vzhledem k průměrnému času obsazení mezistaničního úseku jedním vlakem. Výpočetní čas T je v tomto případě 1440 minut. Časy stálých manipulací $T_{stál}$ a časy pravidelných výluk $T_{výl}$ lze v tomto příkladu zanedbat.

Jako první je třeba zjistit pravděpodobnosti jednotlivých sledů vlaků pomocí obecného vzorce:

$$p(i_s, j_s) = \frac{N_s^i \cdot N_s^j}{N^2}$$
$$p(R_+, R_+) = \frac{N_+^R \cdot N_+^R}{N^2} = \frac{3 \cdot 3}{361} = 0,025$$

Pro ukázkou výpočtu pravděpodobnosti jednotlivých sledů je zde uveden pouze jeden příklad a zbylé lze najít v příloze č. 2 – Pravděpodobnosti jednotlivých sledů v řešeném příkladu.

Dále je nutné z těchto pravděpodobností vypočítat hodnotu četností těchto jednotlivých sledů vlaků pomocí obecného vztahu:

$$h(i_s, j_s) = N \cdot p(i_s, j_s) = \frac{N_s^i \cdot N_s^j}{N}$$
$$h(R_+, R_+) = \frac{N_+^R \cdot N_+^R}{N} = \frac{3 \cdot 3}{19} = 0,474$$

Pro pochopení vztahu mezi pravděpodobnostmi a četnostmi je zde uveden jen jeden příklad výpočtu ze všech četností. Ostatní výpočty četností jednotlivých sledů jsou uvedeny v příloze č. 3 - Četnosti jednotlivých sledů v řešeném příkladu

Pro lepší přehlednost jsou vypočítané pravděpodobnosti jednotlivých sledů a četnosti jednotlivých sledů zpracovány v následující tabulce č. 3.

Tabulka 3 - Pravděpodobnosti a četnosti jednotlivých sledů

Sledy	Pravděpodobnost	Četnost
R_+, R_+	0,025	0,474
R_+, R_-	0,017	0,316
R_-, R_-	0,011	0,211
R_-, R_+	0,017	0,316
R_+, Os_+	0,050	0,947
R_+, Os_-	0,066	1,263
R_-, Os_+	0,033	0,632
R_-, Os_-	0,044	0,842
Os_+, Os_+	0,100	1,895
Os_+, Os_-	0,133	2,526
Os_-, Os_-	0,177	3,368
Os_-, Os_+	0,133	2,526
Os_+, R_+	0,050	0,947
Os_+, R_-	0,033	0,632
Os_-, R_+	0,066	1,263
Os_-, R_-	0,044	0,842
Σ	1,000	19,000

Po stanovení pravděpodobností a četností jednotlivých sledů je nutné provést analytický výpočet nejkratších časů obsazení pro jednotlivé druhy sledů.

$$\tau_{++}^{R-R} = t_{jR}^+ + \tau_{nj}^{PV} = 6 + 3 = 9 \text{ min}$$

$$\tau_{+-}^{R-R} = t_{jR}^+ + \tau_z^{VOP} + \tau_{pv} + t_{jR}^- = 6 + 1 + 4 + 6 = 17 \text{ min}$$

$$\tau_{--}^{R-R} = \tau_{nj}^{PV} + t_{jR}^- = 3 + 6 = 9 \text{ min}$$

$$\tau_{-+}^{R-R} = \tau_{pv} = 4 \text{ min}$$

$$\tau_{++}^{R-OS} = t_{jR}^+ + \tau_{nj}^{RV} = 6 + 1 = 7 \text{ min}$$

$$\tau_{+-}^{R-OS} = t_{jR}^+ + \tau_k + \tau_r^{VOP} + t_{jOS}^- + \tau_z^{VOP} = 6 + 2 + 1 + 10 + 1 = 20 \text{ min}$$

$$\tau_{--}^{R-OS} = \tau_{nj}^{RV} + \tau_r^{VOP} + t_{jOS}^- + \tau_z^{VOP} = 1 + 1 + 10 + 1 = 13 \text{ min}$$

$$\tau_{-+}^{R-OS} = \tau_k = 2 \text{ min}$$

$$\tau_{++}^{OS-OS} = \tau_r^{VOP} + t_{jOS}^+ + \tau_z^{VOP} + \tau_{nj}^{RV} = 1 + 10 + 1 + 1 = 13 \text{ min}$$

$$\begin{aligned} \tau_{+-}^{OS-OS} &= \tau_r^{VOP} + t_{jOS}^+ + \tau_z^{VOP} + \tau_k + \tau_r^{VOP} + t_{jOS}^- + \tau_z^{VOP} \\ &= 1 + 10 + 1 + 2 + 1 + 10 + 1 = 13 \text{ min} \end{aligned}$$

$$\tau_{--}^{OS-OS} = \tau_{nj}^{RV} + \tau_r^{VOP} + t_{jOS}^- + \tau_z^{VOP} = 1 + 1 + 10 + 1 = 13 \text{ min}$$

$$\tau_{-+}^{OS-OS} = \tau_k = 2 \text{ min}$$

$$\tau_{++}^{OS-R} = \tau_r^{VOP} + t_{jOS}^+ + \tau_z^{VOP} + \tau_{nj}^{PV} = 1 + 10 + 1 + 3 = 15 \text{ min}$$

$$\tau_{+-}^{OS-R} = \tau_r^{VOP} + t_{jOS}^+ + \tau_z^{VOP} + \tau_{pv} + t_{jR}^- = 1 + 10 + 1 + 4 + 6 = 22 \text{ min}$$

$$\tau_{--}^{OS-R} = \tau_{nj}^{PV} + t_{jR}^- = 3 + 6 = 9 \text{ min}$$

$$\tau_{-+}^{OS-R} = \tau_{pv} = 4 \text{ min}$$

Výpočet celkového času obsazení koleje všemi sledy vlaků je obsažen v tabulce č. 4.

Tabulka 4 - Celkový čas obsazení koleje všemi sledy vlaků

2.		+		-		Σ
1.		R	Os	R	Os	
+	R	0,474 9 4,266	0,947 7 6,629	0,316 17 5,372	1,263 20 25,26	41,527
	Os	0,947 15 14,205	1,895 13 24,635	0,632 22 13,904	2,526 13 32,838	85,582
-	R	0,316 4 1,264	0,632 2 1,264	0,211 9 1,899	0,842 13 10,946	15,373
	Os	1,263 4 5,052	2,526 2 5,052	0,842 9 7,578	3,368 13 43,784	61,466
Σ		24,787	37,58	28,753	112,828	407,896

Z tabulky lze jednoduše zjistit hodnotu celkového času obsazení koleje všemi sledy vlaků. V tomto případě je tato hodnota 407,896 minut. V další části je nutné vypočítat hodnotu průměrného času obsazení traťové koleje jedním průměrným vlakem.

$$\overline{t_{obs}} = \frac{T_{obs}}{N} = \frac{407,896}{19} = 21,468 \text{ min}$$

Vypočtené hodnotě průměrného času obsazení traťové koleje jedním vlakem odpovídá hodnota minimální časové zálohy 9,4 minut [4].

V dalším kroku je nutné vypočítat hodnotu skutečné zálohy připadající na jeden průměrný vlak, abychom ji mohli porovnat s hodnotou minimální časové zálohy. Pokud je hodnota minimální časové zálohy větší nebo rovna hodnotě skutečné zálohy, pak se ve výpočtu propustné výkonnosti nepokračuje a lze konstatovat, že za daných podmínek není možné realizovat požadovaný rozsah vlakové dopravy, aniž by došlo k nějakým dalším úpravným opatřením.

$$\overline{z} = \frac{T - (T_{výl} + T_{stál} + T_{obs})}{N} = \frac{1440 - 407,896}{19} = 54,321 \text{ min}$$

$$\overline{z} > z_{min}$$

$$54,321 > 9,4$$

V tomto případě lze konstatovat splnění podmínky, protože hodnota skutečné zálohy je větší než hodnota minimální zálohy, tudíž je možné stanovit hodnotu propustné výkonnosti.

$$n_p = \frac{T - (T_{výl} + T_{stál})}{\overline{t_{obs}} + z_{min}} = \frac{1440}{21,468 + 9,4} = 46,650$$

V tomto případě vyšla propustná výkonnost po zaokrouhlení 46 průměrných vlaků za výpočetní čas 1440 minut.

2 Návrh metody výpočtu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy

Jak již bylo zmíněno, tak pro výpočet teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy je nutné znát jednotlivé kategorie v úplavu, a zvláště časové rozestupy mezi jednotlivými kategoriemi, a to jak na vzlet, tak i přistání.

2.1 Turbulence v úplavu

Turbulenci v úplavu lze definovat jako turbulenci produkovanou letounem za letu. Tato turbulence vzniká od okamžiku odlepení kola podvozku od země při vzletu až do doby jeho opětovného dosednutí při přistání, nicméně v praxi vzniká turbulence v úplavu vždy, pokud na křídlo působí vztlak.

Samotný jev turbulence v úplavu způsobuje vyrovnávání tlaku mezi horní a dolní stranou křídla, kdy toto vyrovnání vytváří rotující víry, které působí proti sobě na koncích křídel. Velikost tohoto působení roste s velikostí letounu, rychlostí letounu, tvaru křídla, tvaru zakončení křídla a případně i konfigurací vztlakové mechaniky. To znamená, že velikost tohoto víru na konci křídla může dosáhnout několik centimetrů, ale i metr v průměru u větších letounů s většími křídly. Kvůli vysokým rychlostem se indukované víry na koncích křídel rozpadají velice pomalu a dokáží na daném místě zůstat přibližně po dobu od jedné do tří minut, čímž mohou ovlivnit letoun letící tímto místem za letounem, který vytvořil tyto víry. Nicméně dané víry se na místě vzniku mohou vyskytovat jen krátký moment po vzniku a poté mohou být unášeny okolním větrem směrem dolů, kde po delší době dojde k jejich rozpadu. Doba trvání těchto vírů závisí často na prostředí, ve kterém se vyskytují. Avšak při slabém větru, případně až bezvětří, mohou víry na daném místě setrvat i po dobu pěti minut.

Mezi vlivy, které hlavně ovlivňují letoun letící těmito víry, je vynucené klonění a klopení letounu, ztráta výšky nebo vertikální rychlosti či překročení maximálního povoleného provozního násobku zatížení a tím i k poškození konstrukce letounu. Tyto vlivy jsou nejvíce nebezpečné pro letoun právě během vzletu nebo přistání, protože se letoun nachází ve velmi malé výšce s malou rychlostí, malým výkonem motoru a velmi omezenou reakční dobou pro vybrání nekontrolovatelného chování stroje. V některých případech se tyto vlivy mohou projevit jen minimálně, například jen mírným kmitáním křídel, nicméně v extrémních případech může dojít až úplné ztrátě říditelnosti. Také možnost vybrání tohoto manévru závisí hlavně na výšce letounu nad zemí,

manévrovatelnosti letounu a na výkonech motorů. Nejnebezpečnější situace je, pokud menší letoun vletne přímo do víru způsobeným větším letounem. V tomto případě může dojít právě až k úplné ztrátě kontroly nad letounem.

Protože rychlost, velikost a tvar křídla každého typu letounu jsou velice rozmanité a nedalo by se rozdělit letouny do kategorií podle těchto parametrů, tak pro určování kategorie turbulence v úplavu se využívá maximální vzletová hmotnost.

Letouny se podle maximální vzletové hmotnosti rozdělují na tyto kategorie:

- LIGHT (L) neboli lehký; do této kategorie patří letouny s maximální vzletovou hmotností 7 000 kg a méně.
- MEDIUM (M) neboli střední; do této kategorie patří letouny s maximální vzletovou hmotností mezi 7 000 až 136 000 kg.
- HEAVY (H) neboli těžký; do této kategorie patří letouny s maximální vzletovou hmotností 136 000 kg a více.

Poslední kategorií, která je brána do úvahy, je kategorie:

- SUPER (J) neboli Jumbo; do této kategorie v současné době patří pouze letoun Airbus A380-800.

Nicméně kategorie SUPER není zatím zařazena do předpisů ICAO, tudíž jsou zde pouze doporučené rozstupy mezi letounem nějaké z výše uvedených kategorií a letounem A380-800.

Letoun, který patří do kategorie HEAVY, je povinen při prvním radiovém kontaktu s přiblížovací službou na letišti nebo letištní řídicí věží použít slovo „HEAVY“ ihned za svou volací značkou. Poté dané stanoviště ATC vydá upozornění pro další letouny o možnosti výskytu větší turbulence v úplavu. Velitel letounu letící za letounem kategorie HEAVY se musí přesvědčit, zda rozstup mezi jejich letounem a letounem, který je kategorie HEAVY, případně jakékoliv jiné větší kategorie, než je letoun ovládaný jím, je přijatelný. Pokud uzná za nezbytné zvětšit tento rozstup, informuje o tom stanoviště ATC.

Veškerou zodpovědnost za dodržení bezpečného rozstupu následného letounu za vedoucím letounem nese právě pilot následného letounu. Ten se může rozhodnout, zda je rozstup dostatečný, nebo je-li nutné tento rozstup zvětšit. Pokud se rozhodne o zvětšení rozstupu, je nutné informovat o tomto rozhodnutí příslušné stanoviště řízení letového provozu [2] [8] [9].

2.2 Rozstupy letounů dle kategorie turbulence v úplavu

V některých případech se nevyžaduje, aby stanoviště řízení letového provozu zajišťovalo laterální rozstupy podle kategorie turbulence v úplavu. Tyto případy jsou, pokud:

- letoun řídící se pravidly pro let podle přístrojů provádí vizuální přiblížení a stanoviště řízení letového provozu oznámí vizuální kontakt s předchozím přistávajícím letounem. Stanoviště řízení letového provozu vydá oznámení veliteli následujícího letounu, že má udržovat rozstup od předchozího letounu dle uvážení.
- letoun řídící se pravidly pro let za viditelnosti přistává za letounem kategorie turbulence v úplavu MEDIUM nebo HEAVY [8].

2.2.1 Přistávající letouny

Vyjma případů uvedených v kapitole 3.2 se uplatňují pro přistávající letouny tyto laterální rozstupy:

- letoun kategorie MEDIUM za letounem kategorie HEAVY – 2 minuty
- letoun kategorie LIGHT za letounem kategorie MEDIUM nebo HEAVY – 3 minuty
- letoun kategorie LIGHT za letounem A380-800 – 4 minuty
- letoun kategorie MEDIUM za letounem A380-800 – 3 minuty [8].

Pro lepší přehlednost jsou tyto rozstupy zpracovány v tabulce č. 5.

Tabulka 5 - Časové rozstupy mezi přistávajícími letouny

Předchozí / následující	A380-800	HEAVY	MEDIUM	LIGHT
A380-800			3 min	4 min
HEAVY			2 min	3 min
MEDIUM				3 min
LIGHT				

2.2.2 Vzlétávající letouny

Pro vzlétávající letouny se používají tyto laterální rozstupy:

- letoun kategorie MEDIUM za letounem kategorie HEAVY – 2 minuty
- letoun kategorie LIGHT za letounem kategorie MEDIUM nebo HEAVY – 2 minuty
- letoun kategorie LIGHT za letounem A380-800 – 3 minuty
- letoun kategorie MEDIUM za letounem A380-800 – 3 minuty
- letoun kategorie HEAVY za letounem A380-800 – 2 minuty

Tyto rozstupy se používají, pokud letouny používají:

- stejnou vzletovou a přistávací dráhu;
- paralelní vzletové dráhy, které jsou od sebe vzdáleny 760 metrů (2 500 stop) a méně;
- křižující se vzletové a přistávací dráhy a předpokládaná trajektorie letu druhého letounu protíná předpokládanou trajektorii prvního letounu ve stejné nebo v nižší výšce o 300 metrů (1 000 stop);
- paralelní dráhy, které jsou od sebe vzdáleny 760 metrů (2 500 stop) a více a předpokládaná trajektorie letu druhého letounu protíná předpokládanou trajektorii prvního letounu ve stejné nebo v nižší výšce o 300 metrů (1 000 stop).

Pro lepší přehlednost jsou tyto rozstupy zpracovány v tabulce č. 6.

Tabulka 6 - Časové rozstupy mezi vzlétávajícími letouny

Předchozí / následující	A380-800	HEAVY	MEDIUM	LIGHT
A380-800		2 min	3 min	3 min
HEAVY			2 min	2 min
MEDIUM				2 min
LIGHT				

Minimální rozstup 3 minuty se musí uplatňovat mezi letounem kategorie LIGHT nebo MEDIUM vzlétávajícím za letounem kategorie HEAVY, nebo mezi letounem kategorie LIGHT vzlétávajícím za letounem kategorie MEDIUM, pokud letouny s nižší kategorií vzlétávají ze:

- střední části vzletové a přistávací dráhy;
- střední části paralelní dráhy, která je vzdálena 760 metrů.

Minimální rozstup 4 minuty se musí uplatňovat, pokud letoun kategorie LIGHT nebo MEDIUM vzlétává za letounem A380-800 ze:

- střední části vzletové a přistávací dráhy;
- střední části paralelní dráhy, která je vzdálena 760 metrů [8].

2.2.3 Posunutý práh dráhy pro přistání

Minimální rozstup 2 minut se používá mezi letouny kategorie LIGHT nebo MEDIUM a letounem kategorie HEAVY a mezi letounem kategorie LIGHT a letounem kategorie MEDIUM, pokud používají pro přistání dráhu s posunutým prahem a když:

- vzlétávající letoun kategorie LIGHT nebo MEDIUM následuje za přiletem letounu kategorie HEAVY, nebo pokud vzlétávající letoun kategorie LIGHT následuje za přiletem letounu kategorie MEDIUM;
- přistávající letoun kategorie LIGHT nebo MEDIUM následuje za odletem letounu kategorie HEAVY, nebo pokud přistávající letoun kategorie LIGHT následuje za odletem letounu kategorie MEDIUM a předpokládá se, že jejich plánované dráhy letu se protnou.

Minimální rozstup 2 minut se používá mezi letouny kategorie LIGHT nebo MEDIUM a letounem A380-800, pokud používají pro přistání dráhu s posunutým prahem a když:

- vzlétávající letoun kategorie LIGHT nebo MEDIUM následuje za přiletem letounu A380-800;
- přistávající letoun kategorie LIGHT nebo MEDIUM následuje za odletem letounu A380-800 a předpokládá se, že jejich plánované dráhy letu se protnou [8].

2.2.4 Opačný směr vzletu

Minimální rozstup 2 minut se používá mezi letounem kategorie LIGHT nebo MEDIUM a letounem kategorie HEAVY, nebo mezi letounem kategorie LIGHT a letounem kategorie MEDIUM, pokud těžší letoun provádí nízký průlet nebo nezdařené přiblížení na přistání a lehčí letoun:

- používá pro vzlet opačný směr dráhy;
- přistává na stejnou dráhu v opačném směru nebo na paralelní dráhu vzdálenou 760 metrů (2 500 stop) a méně v opačném směru.

Minimální rozstup 3 minut se používá mezi letounem kategorie LIGHT nebo MEDIUM a letounem A380-800, pokud letoun A380-800 provádí nízký průlet nebo nezdařené přiblížení na přistání a letoun kategorie LIGHT nebo MEDIUM:

- používá pro vzlet opačný směr dráhy;
- přistává na stejnou dráhu v opačném směru nebo na paralelní dráhu vzdálenou 760 metrů (2 500 stop) a méně v opačném směru [8].

2.2.5 Rozstupy založené na vzdálenosti

Následující tabulka naznačuje rozstupy založené na radarové vzdálenosti mezi letouny. Kategorie letounů v tomto rozdělení jsou shodné s kategoriemi letounů podle turbulence v úplavu použitými v předchozích kapitolách. [8]

Tabulka 7 - Rozstupy mezi letouny založené na vzdálenosti

Předchozí / následující	A380-800	HEAVY	MEDIUM	LIGHT
A380-800		6 NM	7 NM	8 NM
HEAVY		4 NM	5 NM	6 NM
MEDIUM				5 NM
LIGHT				

2.3 Koncept výpočtu teoretické kapacity

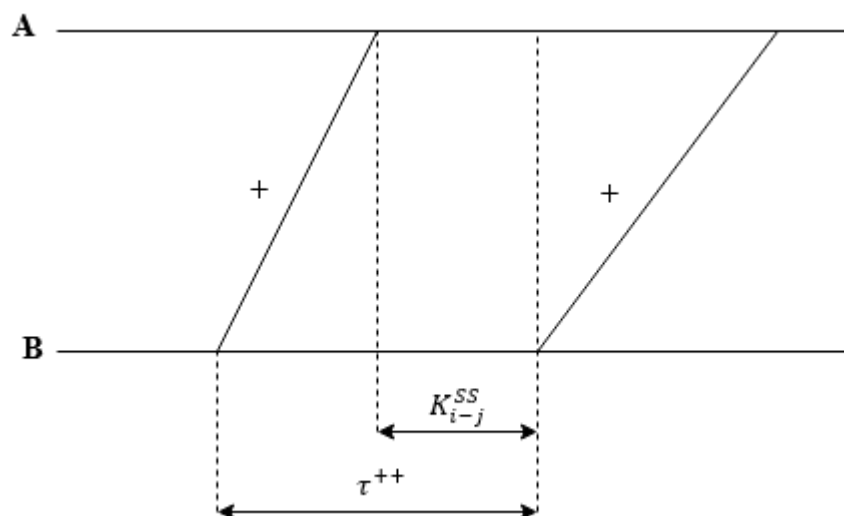
Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole, propustnou výkonnost neboli kapacitní možnosti vzletové a přistávací dráhy budou počítány ve stochastických podmínkách, protože veškerý letový provoz se uskutečňuje právě v podmínkách, kde veličiny mají charakter náhodných proměnných. Z tohoto důvodu je často nutné uvažovat s jistými časovými rezervami, aby se předešlo případným nebezpečným situacím a případně až kolizím.

V tomto návrhu metody výpočtu je mezistaniční úsek tvořen celou vzletovou a přistávací dráhou a v některých případech je k tomuto úseku připočten přibližovací úsek. Jedná se o případy, kdy první nebo případně druhý z letounů provádí manévry přistání na vzletovou a přistávací dráhu. Při výpočtu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy je nutné rozlišovat druhy letounů podle kategorie turbulence v úplavu. Podle předpisu L4444 se letouny rozdělují do čtyř kategorií, a to na kategorii na light (lehký), medium (střední), heavy (těžký) a super (jumbo). Dále je nutné znát, jestli u letounu dochází ke vzletu nebo přistání na vzletovou a přistávací dráhu. Pokud letoun provádí manévry vzletu, poté se označuje znaménkem - a pokud letoun provádí přistávací manévry, je označen znaménkem +. Z toho plyne, že je možných celkem 64 kombinací mezi vzlétávajícími nebo přistávajícími letouny stejných nebo různých kategorií v úplavu. Protože se v tomto případě vyskytují různé kategorie letounů, ať už při vzletovém nebo přistávacím manévru, je nutné tyto operace řadit tak, aby byl letový tok co nejvíce plynulý a maximálně bezpečný. K výpočtu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy je nutné znát:

- typy letounů dle kategorie turbulence v úplavu,
- časové rozstupy mezi letouny dle kategorie turbulence v úplavu,
- naměřené doby vzletů a přistání jednotlivých typů letounů,
- čas pravidelných kontrol vzletové a přistávací dráhy,
- výpočetní čas.

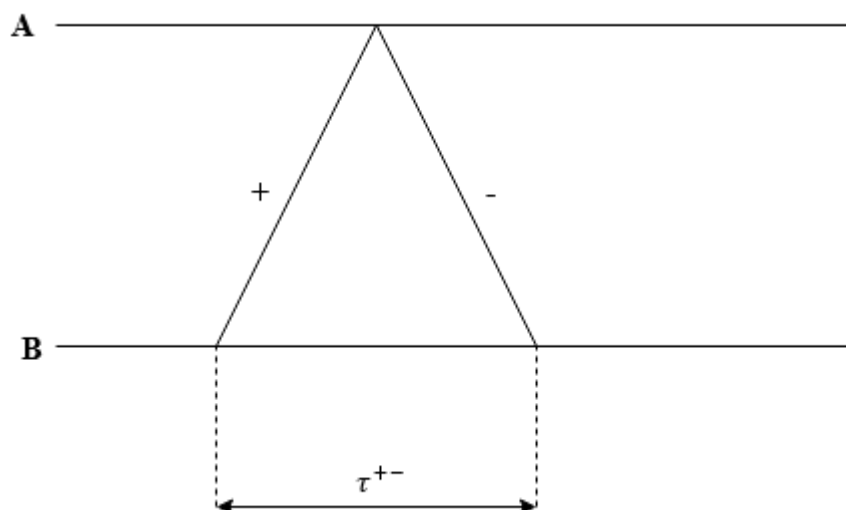
Při řešení teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy mohou nastat čtyři druhy nejkratších časů obsazení. Prvním druhem je situace, kdy první letoun přistává a druhý letoun přistává po prvním letounu. Tento druh nejkratšího obsazení vzletové a přistávací dráhy se označuje τ^{++} a je naznačen na následujícím obrázku. V tomto případě se nejkratší čas obsazení vzletové a přistávací dráhy daným druhem sledu letounů skládá z času přistání prvního z letounů a bezpečnostního časového rozstupu mezi letouny

dle kategorie turbulence v úplavu. Na obrázku č. 5 je písmenem A označena první stop příčka, kterou přejede letoun provádějící manévry přistání a písmenem B je označen bod dosažení výšky rozhodnutí dle stanovené kategorie ILS na daném letišti.



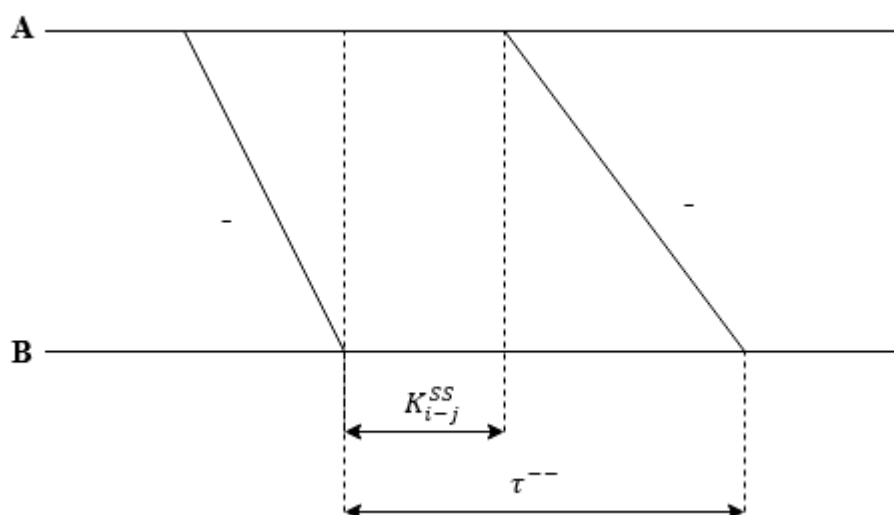
Obrázek 5 - Příklad přistání jednoho letounu a za ním přistání dalšího letounu

Dalším druhem nejkratšího času obsazení vzletové a přistávací dráhy je, kdy první letoun přistává na dráhu a po ukončení tohoto manévru provede druhý letoun z této dráhy vzlet. Tento případ se značí τ^{+-} a je naznačen na obrázku č. 6. V tomto případě se nejkratší čas obsazení vzletové a přistávací dráhy daným druhem sledu letounů skládá z času přistání prvního z letounů a času vzletu druhého z dvojice letounů. Písmenem A je označena první stop příčka, kterou přejede letoun provádějící manévry přistání nebo poslední stop příčka, kterou přejede letoun provádějící manévry vzletu. Písmenem B je označen bod dosažení výšky rozhodnutí dle stanovené kategorie ILS na daném letišti pro přistávající letoun a pro vzlétávající letoun označuje toto písmeno konec vzletové a přistávací dráhy. Z důvodu určení jednotlivých začátku a konců časů měření v tomto případě není nutné zajišťovat dodatečný časový rozstup mezi letouny, protože bezpečný rozstup je dán již měřením. V případě, kdy první letoun přistává na dráhu a hned za ním následuje vzlet následujícího letounu, se neuplatňuje bezpečnostní časový rozstup dle kategorie turbulence v úplavu.



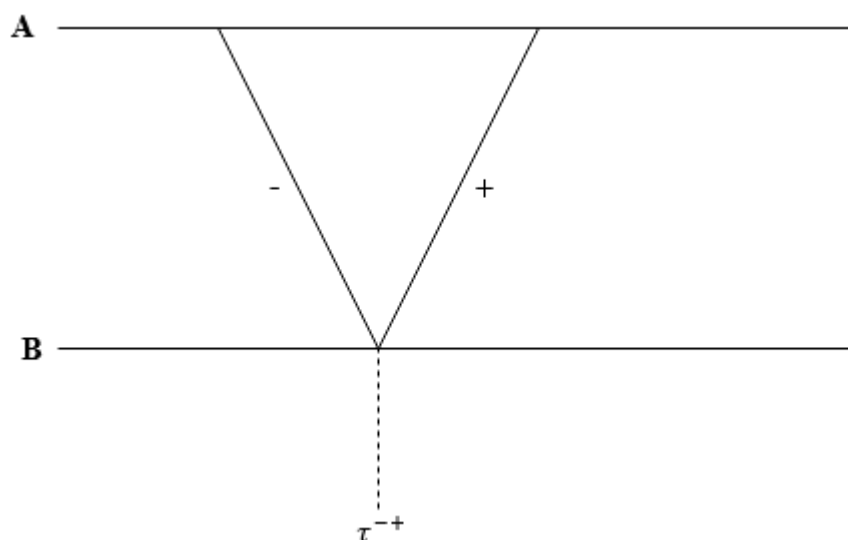
Obrázek 6 - Příklad přistání jednoho letounu a za ním vzletu dalšího letounu

Třetím způsobem nejkratšího času obsazení vzletové a přistávací dráhy je ten, kdy první letoun provádí vzletový manévr ze vzletové a přistávací dráhy a druhý provádí tentýž manévr po něm ze stejné dráhy. Tento způsob se označuje τ^{--} a je znázorněn na obrázku č. 7. V tomto případě se nejkratší čas obsazení vzletové a přistávací dráhy daným druhem sledem letounů skládá z bezpečnostního časového rozstupu mezi letouny dle kategorie turbulence v úplavu a času vzletu druhého ze sledu letounů. Písmenem A je značena poslední stop příčka, kterou přejede vzletávající letoun a písmenem B se označuje konec vzletové a přistávací dráhy.



Obrázek 7 - Příklad vzletu jednoho letounu a za ním vzletu dalšího letounu

Posledním způsobem je, když první letoun provádí vzletový manévr ze vzletové a přistávací dráhy a po tomto letounu provádí druhý letoun přistávací manévr na tuto dráhu. Zde se nejkratší čas označuje τ^{-+} a je naznačen v obrázku č. 8. V tomto případě se nejkratší čas obsazení vzletové a přistávací dráhy daným druhem sledem letounů rovná nule. Tento jev je dán tím, že z předpokladu měření dat je zajištěn základní rozstup mezi vzlétávajícím a přistávajícím letounem. Písmenem A je označena první stop příčka, kterou přejede letoun provádějící manévr přistání nebo poslední stop příčka, kterou přejede letoun provádějící manévr vzletu. Písmenem B je označen bod dosažení výšky rozhodnutí dle stanovené kategorie ILS na daném letišti pro přistávající letoun a pro vzlétávající letoun označuje toto písmeno konec vzletové a přistávací dráhy. Obdobně jako v druhém případě není nutné zde zajišťovat dodatečný časový rozstup z důvodu určení jednotlivých začátku a konců času měření vzletu a přistání, protože bezpečnostní rozstup je zajištěn již tímto určením. V případě, kdy první letoun provádí manévr vzletu z dané dráhy a hned za ním následuje přistání následujícího letounu, se neuplatňuje bezpečnostní časový rozstup dle kategorie turbulence v úplavu.



Obrázek 8 - Příklad vzletu jednoho letounu a za ním přistání dalšího letounu

Pro leteckou aplikaci této metody je nutné pro výpočet průměrného času obsazení vzletové a přistávací dráhy jedním průměrným letounem $\overline{t_{obs}}$ zjistit:

- pravděpodobnosti jednotlivých druhů sledů letounů za výpočetní období,
- četnosti jednotlivých druhů sledů letounů a celkový počet letounů za výpočetní období,
- nejkratší čas obsazení vzletové a přistávací dráhy jednotlivými druhy sledů letounů, jež je tvořen průměrnými časy manévrů na vzletu nebo přistání letounů dané kategorie a případným časovým rozstupem mezi daným sledem letounů,
- celkový nejkratší čas obsazení vzletové a přistávací dráhy všemi druhy sledů letounů T_{obs} .

Pravděpodobnosti jednotlivých druhů sledů letounů lze získat pomocí vztahu:

$$p(i^S, j^S) = \frac{N_i^S \cdot N_j^S}{N^2}, \quad (2.1)$$

kde:

$p(i^S, j^S)$... pravděpodobnosti jednotlivých druhů sledů letounů [-],

N_i^S ... počet letounů kategorie i (light, medium, heavy, super), které buď provádí manévr vzletu (značeno -) nebo manévr přistání (značeno +) [-],

N_j^S ... počet letounů kategorie j (light, medium, heavy, super), které buď provádí manévr vzletu (značeno -) nebo manévr přistání (značeno +) [-],

N ... počet všech letounů [-].

Četnosti jednotlivých druhů sledů vlaků lze získat pomocí vztahu:

$$h(i^S, j^S) = N \cdot p(i^S, j^S) = \frac{N_i^S \cdot N_j^S}{N}, \quad (2.2)$$

kde:

$h(i^S, j^S)$... četnosti jednotlivých druhů sledů letounů [-],

N_i^S ... počet letounů kategorie i (light, medium, heavy, super), které buď provádí manévr vzletu (značeno -) nebo manévr přistání (značeno +) [-],

N_j^S ... počet letounů kategorie j (light, medium, heavy, super), které buď provádí manévr vzletu (značeno -) nebo manévr přistání (značeno +) [-],

N ... počet všech letounů [-].

K tomu, aby bylo možné stanovit hodnotu jednotkového nejkratšího času obsazení vzletové a přistávací dráhy daným druhem sledem letounů, je třeba pro leteckou aplikaci výpočtu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy zprůměrovat čas manévru, který je potřebný pro vzlet nebo přistání pro danou jednu kategorii letounu dle turbulence v úplavu. Tento čas lze stanovit pomocí vzorce:

$$T_i^S = \frac{\sum_1^{N_i^S} t_i^S}{N_i^S}, \quad (2.3)$$

kde:

T_i^S ... průměrný čas manévru ze všech letounů kategorie i (light, medium, heavy, super), provádějící manévr vzletu (značeno -) nebo manévr přistání (značeno +) [s],

t_i^S ... čas manévru každého letounu kategorie i (light, medium, heavy, super), které buď provádí manévr vzletu nebo manévr přistání [s],

N_i^S ... počet letounů kategorie i (light, medium, heavy, super), které buď provádí manévr vzletu, nebo manévr přistání [-].

Tímto způsobem lze stanovit průměrný čas manévrů, který je třeba pro vzlet nebo přistání pro danou kategorii.

Hodnotu jednotkového nejkratšího času obsazení vzletové a přistávací dráhy daným druhem sledu letounů lze stanovit pomocí čtyř vzorců, které se liší podle prováděných manévrů letounů v daném sledu. V některých případech sledů letounů není třeba žádného časového rozstupu mezi daným sledem letounů, tudíž místo hodnoty K_{i-j}^{SS} lze napsat 0 (viz kapitola Turbulence v úplavu).

První vzorec výpočtu nejkratšího času obsazení vzletové a přistávací dráhy daným druhem sledu letounů je pro případ, kdy oba letouny v tomto sledu provádí manévr přistání:

$$\tau_{i-j}^{++} = T_i^+ + K_{i-j}^{++}, \quad (2.4)$$

kde:

τ_{i-j}^{++} ... jednotkový nejkratší čas obsazení vzletové a přistávací dráhy daným druhem sledu letounů, které provádí manévr přistání[s],

T_i^+ ... průměrný čas manévru ze všech letounů kategorie i (light, medium, heavy, super) provádějící manévr přistání [s],

K_{i-j}^{SS} ... časový rozstup dle kategorie turbulence v úplavu mezi daným druhem sledu letounů, které provádí manévr přistání [s].

Druhým případem je, kdy první letoun provádí manévr přistání a následující letoun provádí manévr vzletu:

$$\tau_{i-j}^{+-} = T_i^+ + T_j^-, \quad (2.5)$$

kde:

τ_{i-j}^{+-} ... jednotkový nejkratší čas obsazení vzletové a přistávací dráhy daným druhem sledu letounů, z nichž první letoun provádí manévr přistání a následující letoun manévr vzletu[s],

T_i^+ ... průměrný čas manévru ze všech letounů kategorie i (light, medium, heavy, super), provádějící manévr přistání [s],

T_j^- ... průměrný čas manévru ze všech letounů kategorie j (light, medium, heavy, super), provádějící manévr vzletu [s].

Třetí vzorec výpočtu nejkratšího času obsazení vzletové a přistávací dráhy daným druhem sledu letounů je pro kombinaci letounů, které oba provádí manévr vzletu:

$$\tau_{i-j}^{--} = K_{i-j}^{--} + T_j^{-}, \quad (2.6)$$

kde:

τ_{i-j}^{--} ... jednotkový nejkratší čas obsazení vzletové a přistávací dráhy daným druhem sledu letounů, které provádí manévr vzletu[s],

K_{i-j}^{--} ... časový rozstup dle kategorie turbulence v úplavu mezi daným druhem sledu letounů, které provádí manévr vzletu [s].

T_j^{-} ... průměrný čas manévru ze všech letounů kategorie j (light, medium, heavy, super) provádějící manévr vzletu [s].

Posledním případem je výpočet nejkratšího času obsazení vzletové a přistávací dráhy daným druhem sledu letounů, z nichž první letoun provádí manévr vzletu a následující letoun provádí manévr přistání:

$$\tau_{i-j}^{-+} = 0, \quad (2.7)$$

kde:

τ_{i-j}^{-+} ... jednotkový nejkratší čas obsazení vzletové a přistávací dráhy daným druhem sledu letounů, z nichž první letoun provádí manévr vzletu a následující letoun provádí manévr přistání [s].

Důvodem, že v posledním případě je τ_{i-j}^{-+} vždy nulová, je dodržení způsobu měření vzletů a přistání jednotlivých letounů. Pokud je dodržen přesný postup měření doby vzletu nebo přistání jednotlivých letounů, který je popsán v této práci v kapitole 4.2 Naměřené doby vzletů a přistání, je hodnota τ_{i-j}^{-+} vždy nulová, protože již samotným měřením je dodržen bezpečnostní rozstup mezi letouny.

Hodnotu celkového času obsazení všemi sledy letounů lze získat pomocí tabulky, ve které lze získat hodnotu celkového nejkratšího času obsazení všemi sledy letounů daného druhu jako součin četnosti výskytu daného druhu sledu a jednotkového času nejkratšího sledu obsazení vzletové a přistávací dráhy.

Tabulka 8 - Hodnota celkového času obsazení všemu sledy letounů daného druhu

Četnost výskytu sledu letounů	
Jednotkový nejkratší čas obsazení daným druhem sledu letounů	Celkový nejkratší čas obsazení všemi sledy daného druhu letounů

Průměrný čas obsazení vzletové a přistávací dráhy průměrným letounem lze vypočítat pomocí vztahu:

$$\overline{t_{obs}} = \frac{T_{obs}}{N}, \quad (2.8)$$

kde:

$\overline{t_{obs}}$... průměrný čas obsazení vzletové a přistávací dráhy průměrným letounem [s],

T_{obs} ... celkový nejkratší čas obsazení všemi sledy a druhy letounů [s],

N ... počet všech letounů [-].

Skutečnou průměrnou zálohu připadající na průměrný letoun je dána vztahem:

$$\bar{z} = \frac{T - (T_{ctrl} + T_{obs})}{N}, \quad (2.9)$$

kde:

\bar{z} ... skutečná průměrná záloha připadající na průměrný letoun [s],

T_{ctrl} ... čas pravidelných kontrol [s],

T_{obs} ... celkový nejkratší čas obsazení všemi sledy a druhy letounů [s],

N ... počet všech letounů [-].

Podmínkou stanovení propustné výkonnosti u železniční dopravy bylo, aby skutečná průměrná záloha připadající na jeden vlak byla větší než minimální časová záloha. Pro leteckou aplikaci neexistuje tabulkově daná minimální časová záloha, nicméně v praxi lze tuto hodnotu stanovit procentuálně z průměrného času obsazení vzletové a přistávací dráhy jedním letounem. Na základě konzultace s vedoucím diplomové práce byla tato hodnota stanovena jako jedna čtvrtina z průměrného času obsazení vzletové a přistávací dráhy jedním letounem. Po zjištění hodnoty minimální časové zálohy je nutné i u letecké aplikace porovnat tuto hodnotu s hodnotou skutečné průměrné zálohy připadající na jeden letoun, která musí být větší než hodnota minimální časové zálohy.

Teoretickou kapacitu vzletové a přistávací dráhy je dána vzorcem:

$$C = \frac{T - T_{ctrl}}{\overline{t_{obs}} + z_{min}}, \quad (2.10)$$

kde:

C ... teoretická kapacita vzletové a přistávací dráhy [s],

T ... výpočetní čas [s],

T_{ctrl} ... čas pravidelných kontrol [s],

$\overline{t_{obs}}$... průměrný čas obsazení vzletové a přistávací dráhy jedním letounem [s],

z_{min} ... minimální časová záloha [s].

Hodnota teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy se zaokrouhluje dolů na nejbližší celé číslo.

2.4 Čas pravidelných kontrol

Informace o stavu vzletové a přistávací dráhy a k ní patřících pohybových ploch musí být poskytovány příslušným složkám letecké informační služby a řízení letového provozu, aby mohly být poskytnuty nezbytné informace o provozuschopnosti dráhy přistávajícím a vzlétávajícím letounům. Tyto informace musí být udržovány velmi aktuální a v případě změny musí být ihned změněny. Personál, který tyto informace vyhodnocuje a následně hlásí stav na dráze a pohybových plochách, musí absolvovat příslušný výcvik a být zcela způsobilý pro tuto činnost, aby dokázal splnit kritéria předepsaná Úřadem pro civilní letectví.

Prohlídky vzletové a přistávací dráhy a k ní náležejících pohybových ploch musí být prováděny nejméně jedenkrát za 24 hodin pro letiště s kódovým číslem 1 a 2 a nejméně čtyřikrát během 24 hodin pro letiště s kódovým číslem 3 a 4 [7].

3 Aplikace navržené metody

V této kapitole je aplikována metoda propustné výkonnosti pro leteckou dopravu a také je zde popsáno Letiště Leoše Janáčka Ostrava, na kterém probíhalo měření vzletů a přistání letounů, které bude dále zpracováno pro vyhodnocení teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy.

3.1 Letiště Leoše Janáčka Ostrava

Letiště Leoše Janáčka Ostrava je třetí největší letiště v České republice po letišti Václava Havla v Praze a po letišti Brno Tuřany. Jedná se o mezinárodní letiště s nepřetržitým provozem. ICAO kód letiště je LKMT a IATA kód letiště je OSR. Letiště se nachází v nadmořské výšce 257 metrů nad mořem.

Vzletová a přistávací dráha tohoto letiště má délku 3 511 metrů a šířku 63 metrů. Celá dráha byla vyrobena z betonu a je umístěna v magnetickém směru 04-22. Letiště je vybaveno přístrojem ILS kategorie III. Tento systém poskytuje pilotovi přesné informace o okamžité poloze letounu vzhledem k referenční trajektorii, která je vytvořena dvojicí majáků pomocí směrového radiového signálu. Systém ILS umožňuje pilotům přesně vést letoun na přistání podle přístrojů do výšky a vzdálenosti od prahu dráhy, kdy pilot může bezpečně přistát, nebo přistání zrušit. Vzletová a přistávací dráha je spojena s odbavovací plochou pomocí sedmi pojezdových drah značených A až G.

V roce 2017 bylo na letišti Leoše Janáčka Ostrava odbaveno celkem 324 116 cestujících. Jedná se asi o 26 % meziroční nárůst. Z celkových 324 116 cestujících bylo 26 687 cestujících, kteří využili možnost vnitrostátního letu. Dále 283 605 cestujících, kteří využili možnost mezinárodního letu, 11 972 tranzitních cestujících a 1 852 cestujících, u kterých je využita jiná možnost přepravy, která není blíže specifikována. Menší počet tranzitních cestujících oproti roku 2016 byl způsoben rušením letů přes letiště Brno Tuřany z důvodu směřování charterových letů přímo z ostravského letiště, a ne letiště Brno Tuřany. Počet cestujících vzrostl hlavně z důvodu provozování pravidelných linek společnosti Ryanair do Londýna a Milána. Také linka Ostrava-Dubaj zaznamenala nárůst cestujících, nicméně v současnosti se již tato linka neprovozuje. Oživení nastalo také v oblasti charterových letů, kde díky zlepšení bezpečnostní situace a růstem hospodářství došlo k nárůstu počtu cestujících do destinací v Egyptě, Turecku, Bulharsku a Řecku.

V současnosti je hlavním dopravcem působícím na letišti Leoše Janáčka po celý rok pouze společnost Ryanair, která zajišťuje spojení Ostrava-Londýn letouny Boeing 737-800.

Celkového počtu pohybů letounů 20639 bylo dosaženo na letišti Leoše Janáčka Ostrava byl v roce 2017. Jedná se o velmi malý meziroční pokles přibližně jednoho procenta ze všech pohybů letounů z minulého roku. Tento jev je způsoben hlavně poklesem příletů a odletů výcvikových letů a letů všeobecného letectví. Celkový počet komerčních osobních letů byl 4 047, což je o 235 letů víc než v roce 2016. Cargo letů se uskutečnilo v roce 2017 celkem 646, což je nárůst o celkem 63 letů. Hlavním cargo dopravcem na letišti Leoše Janáčka Ostrava je společnost DHL, která spojuje letiště Lipsko s letištěm Ostrava. Letů všeobecného letectví, výcvikových letů a jiných bylo v roce 2017 celkem 15 946, což je pokles asi o 2 % oproti roku 2016 [10] [11].

3.2 Naměřené doby vzletů a přistání

Dobu, za kterou letoun buďto vzlétne nebo přistane, ovlivňuje mnoho faktorů jako například převládající meteorologické podmínky na daném letišti, parametry letounu, parametry dráhy, poloha letiště, lidský faktor a mnoho dalších.

Doba vzletu je v tomto případě dána jako interval, kdy letoun přejede poslední stop příčky dané pojezdové dráhy před vzletovou a přistávací drahou až po zdárné opuštění této vzletové a přistávací dráhy.

Doba přistání je určena jako interval od dosažení výšky rozhodnutí dle kategorie ILS na daném letišti až po dosáhnutí první stop příčky pojezdové dráhy po uvolnění vzletové a přistávací dráhy.

K určení těchto dob byly použity hodnoty časů z CWS pozemního pojezdového radaru a CSW TWR radaru na letišti Leoše Janáčka v Ostravě. Hodnota výšky rozhodnutí dle kategorie ILS na tomto letišti byla určena pomocí sekundárního radaru v módu C daného měřeného letounu. Překročení stop příčky u dané pojezdové dráhy bylo určeno pomocí CWS pozemního pojezdového radaru. Detailní obrázky znázorňující průběh měření a určení přesné doby přistání jednoho z letounů lze najít v příloze číslo 1.

Celkem bylo realizováno 80 měření dob vzletů a přistání na letišti Leoše Janáčka Ostrava, které lze nalézt v příloze č. 4 – Naměřené doby vzletů a přistání, přičemž v celém naměřeném souboru se vyskytují letouny převážně pouze dvou kategorií letounů dle turbulence v úplavu, a to letouny kategorie lehký (light) a střední (medium). Letoun kategorie turbulence v úplavu těžký (heavy) se vyskytuje pouze ve dvou případech.

Tento fakt je dán povahou provozu na letišti Leoše Janáčka v Ostravě. Všechny naměřené doby vzletů nebo přistání jednotlivých letounů budou brány jako sled jednotlivých letounů za sebou [3].

3.3 Statistické zpracování naměřených dat

Pro zpracování této kapitoly byly použity zdroje [5] [6].

Pro správné určení teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy je nutné soubor naměřených dat statisticky zpracovat. Soubor naměřených dat je rozdělen celkem do pěti skupin podle kategorie letounu dle turbulence v úplavu a prováděného manévru. Konkrétně se jedná o skupiny, kdy letoun kategorie light provádí manévr vzletu (L^-), letoun kategorie light provádějící manévr přistání (L^+), letoun kategorie medium vykonávající manévr vzletu (M^-), letoun kategorie medium provádějící manévr přistání (M^+) a letoun kategorie heavy vykonávající manévr přistání (H^+).

Jelikož rozsah souboru naměřených dat obsahuje 80 naměřených hodnot, jedná se o výběr s velkým rozsahem. Celý statistický soubor je popsán pomocí číselných charakteristik, které se dělí na více druhů, avšak pro potřeby statistického zpracování tohoto souboru jsou použity pouze dva druhy, a to vybrané charakteristiky polohy a variability. Charakteristiky polohy udávají typické rozložení hodnot souboru a charakteristiky variability stanovují rozložení hodnot kolem své typické hodnoty. Mimo charakteristiky polohy a variability je zde navíc uveden variační obor.

Před statistickým zpracováním je nutné si daný datový soubor rozdělit do skupin dle kategorií turbulence v úplavu a také dle daného manévru, který letoun provádí. V naměřeném souboru dat se vyskytuje celkem 29 letounů kategorie light dle turbulence v úplavu, přičemž 20 z nich provádí manévru vzletu a zbývajících 9 provádí manévr přistání. Nejpočetnější skupina letounů dle kategorie turbulence v úplavu je medium. Těchto letounů se vyskytuje v naměřeném souboru celkem 49, přičemž 28 z nich provádí manévr vzletu a pouze 21 manévr přistání. Poslední skupinou letounů, vyskytující se v naměřeném souboru dat, jsou letouny označovány jako heavy. V celém souboru se vyskytují pouze dvakrát a v obou těchto případech provádí manévr přistání.

Z hlediska vyváženosti celkového počtu vzletů a přistání na vzletovou a přistávací dráhu mírně převyšuje počet vzletů, kterých je celkem 48. Oproti tomu se manévr vzletu v daném datovém souboru vyskytuje celkem 32krát.

Tabulka 9 - Četnosti letounů

Typ letounů dle kategorie turbulence v úplavu	Počet letounů za výpočetní čas	
	- (vzlet)	+ (přistání)
Light	20	9
Medium	28	21
Heavy	0	2
Σ	48	32
	80	

Variační obor

První popisovanou a vypočtenou charakteristikou je variační obor. Tato charakteristika je dána jako interval, který je tvořen minimální variantou proměnné v_{min} , maximální hodnotou proměnné v_{max} a všemi ostatními proměnnými mezi v_{min} a v_{max} . Variační obor je z obou stran uzavřený a zapisujeme jej jako: $\langle v_{min}, v_{max} \rangle$. Z tabulky naměřených hodnot jsem zjistil minimální a maximální čas vzletového nebo přistávacího manévru letounu jakékoliv kategorie turbulence v úplavu.

$$V_{min} = 64 \text{ s}, \quad V_{max} = 250 \text{ s}.$$

Variační rozpětí

Variační rozpětí R je definováno jako rozdíl maximální a minimální varianty proměnné.

$$R = V_{max} - V_{min} = 250 - 64 = 186 \text{ s} \quad (3.1)$$

Z naměřených hodnot jsem zjistil, že hodnota variačního rozpětí celého naměřeného souboru je 186 s. V tabulce č. 10 jsou zpracovány minimální a maximální čas letounů určité kategorie turbulence v úplavu, které provádí daný manévr. Dále je k těmto hodnotám vypočítáno variační rozpětí. Nejmenší variační rozpětí lze najít u kategorie turbulence v úplavu heavy, kdy tyto letouny provádí manévr přistání. Největší variační rozpětí, a to 151 sekund, má soubor s letouny kategorie light, které provádí manévr vzletu. Tento jev je dán rozdílnými typy letounů v této kategorii

Tabulka 10 - Variační rozpětí

	V_{min} [s]	V_{max} [s]	Variační rozpětí [s]
Celý soubor	64	250	186
L⁺	70	136	66
L⁻	64	215	151
M⁺	78	144	66
M⁻	67	200	133
H⁺	200	250	50

Aritmetický průměr

Aritmetický průměr lze definovat jako veličinu, jež vyjadřuje typickou hodnotu popisující daný statistický soubor. Tato charakteristika se stanoví jako součet všech pozorování vyděleným rozsahem tohoto souboru, přičemž všechny jednotlivé hodnoty ve statistickém souboru mají stejnou váhu. Aritmetický průměr se značí \bar{x} a lze jej vypočítat vztahem:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.2)$$

kde:

\bar{x} ... aritmetický průměr [s],

n ... rozsah souboru [-],

x_i ... jednotlivá pozorování [s].

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{80} \cdot 8917 = 114,46 \text{ s.}$$

Pro naměřený statistický soubor je hodnota aritmetického průměru 114,46 s. Ostatní hodnoty aritmetického průměru lze najít v tabulce č. 11, přičemž největší hodnota této veličiny je pro letouny kategorie heavy, které provádí manévry přistání. Tato hodnota je způsobena tím, že v celém naměřeném souboru se vyskytují pouze dvě měření této kategorie. Ostatní hodnoty aritmetického průměru daných kategorií jsou přibližně stejné.

Tabulka 11 - Aritmetický průměr naměřených časů

	Četnost	$\Sigma [s]$	Aritmetický průměr [s]
Celý soubor	80	8917	114,46
L⁺	9	913	101,44
L⁻	20	2270	113,50
M⁺	21	2185	104,05
M⁻	28	3099	110,68
H⁺	2	450	225,00

Výběrový rozptyl

Charakteristika výběrového rozptylu definuje, jak moc jsou hodnoty rozptýleny v daném souboru. Výběrový rozptyl se značí s^2 a lze jej vypočítat pomocí vzorce:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (3.3)$$

kde:

s^2 ... výběrový rozptyl [s^2],

n ... rozsah souboru [-],

x_i ... jednotlivá pozorování [s],

\bar{x} ... aritmetický průměr [s].

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{80-1} \cdot 104602,32 = 1324,08 \text{ s}^2.$$

Pro daný statistický soubor je hodnota výběrového rozptylu rovna 1324,08 s^2 . Ostatní hodnoty výběrové rozptylu jsou vypočteny v tabulce č. 12. Největší hodnota této veličiny je pro letouny kategorie light, které provádí manévry vzletu, tudíž rozptýlenost časů v této kategorii je největší. Nejmenší hodnoty této veličiny jsou pro letouny kategorie light a medium, přičemž pro letouny z této kategorie platí, že provádí manévry přistání. Tento fakt vypovídá o tom, že naměřené časy jsou pro tyto kategorie s daným manévrem podobné a neliší se od sebe v tak velké míře, jako u hodnot pro kategorii heavy provádějící manévry přistání.

Tabulka 12 - Výběrový rozptyl

	Výběrový rozptyl [s ²]
Celý soubor	1324,08
L⁺	470,03
L⁻	2106,16
M⁺	505,65
M⁻	797,12
H⁺	1250,00

Výběrová směrodatná odchylka

Tato charakteristika určuje, jak moc jsou hodnoty daného statistického souboru odchýleny od jeho průměrné hodnoty. V případě, že všechny prvky statistického souboru se sobě rovnají, je směrodatná odchylka rovná nule, avšak pokud se prvky sobě nerovnají, je směrodatná odchylka větší než nula. Výběrová směrodatná odchylka má značku s a lze ji stanovit pomocí vzorce:

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3.4)$$

kde:

s ... výběrová směrodatná odchylka [s],

s^2 ... výběrový rozptyl [s²],

n ... rozsah souboru [-],

x_i ... jednotlivá pozorování [s],

\bar{x} ... aritmetický průměr [s].

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{1324,08} = 36,39 \text{ s.}$$

V daném statistickém souboru je hodnota výběrové směrodatné odchylky rovna 36,39 sekundám. Hodnoty výběrové směrodatné odchylky pro všechny naměřené kategorie s daným manévrem lze najít v tabulce č. 13. Největší rozptýlenost od průměrné hodnoty, a tudíž i největší výběrovou směrodatnou odchylku, mají letouny kategorie light, které provádí manévr vzletu. Naopak nejmenší hodnotu této veličiny mají letouny light dle kategorie turbulence v úplavu provádějící manévr přistání.

Tabulka 13 - Výběrová směrodatná odchylka

	Výběrová směrodatná odchylka [s]
Celý soubor	36,39
L⁺	21,68
L⁻	45,89
M⁺	22,49
M⁻	28,23
H⁺	35,36

4 Výpočet teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy

Prvním krokem pro zjištění teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy je výpočet pravděpodobností jednotlivých sledů pomocí vzorce:

$$p(i^S, j^S) = \frac{N_i^S \cdot N_j^S}{N^2}$$

$$p(L^+, L^+) = \frac{N_L^+ \cdot N_L^+}{N^2} = \frac{9 \cdot 9}{6400} = 0,013$$

Pro názornou ukázkou výpočtu pravděpodobnosti jednotlivých sledů letounů je zde uveden pouze jeden vypočtený příklad. Ostatní výpočty pro jednotlivé sledy lze najít v příloze č. 5 – Pravděpodobnosti jednotlivých sledů letounů

Po vypočtení jednotlivých pravděpodobností všech možných sledů je nutné stanovit také četnosti těchto jednotlivých sledů. Tyto četnosti se vypočítají dle vzorce:

$$h(i^S, j^S) = N \cdot p(i^S, j^S) = \frac{N_i^S \cdot N_j^S}{N}$$

$$h(L^+, L^+) = \frac{N_L^+ \cdot N_L^+}{N} = \frac{9 \cdot 9}{80} = 1,013$$

Pro naznačení vztahu mezi pravděpodobností a četností je zde uveden jeden ukázkový příklad výpočtu četností sledu letounů. Ostatní výpočty četností jednotlivých sledů letounů jsou uvedeny v příloze č. 6 - Četnosti jednotlivých sledů letounů.

Pro lepší přehlednost jsou všechny pravděpodobnosti a četnosti jednotlivých sledů zpracovány v tabulce č. 14.

Tabulka 14 - Pravděpodobnosti a četnosti jednotlivých sledů letounů

Sledy	Pravděpodobnost	Četnost
L^+, L^+	0,013	1,013
L^+, L^-	0,028	2,250
L^-, L^-	0,063	5,000
L^-, L^+	0,028	2,250
L^+, M^+	0,030	2,363
L^+, M^-	0,039	3,150
L^-, M^+	0,066	5,250
L^-, M^-	0,088	7,000
L^+, H^+	0,003	0,225
L^-, H^+	0,006	0,500
M^+, M^+	0,069	5,513
M^+, M^-	0,092	7,350
M^-, M^-	0,123	9,800
M^-, M^+	0,092	7,350
M^+, L^+	0,030	2,363
M^+, L^-	0,066	5,250
M^-, L^+	0,039	3,150
M^-, L^-	0,088	7,000
M^+, H^+	0,007	0,525
M^-, H^+	0,009	0,700
H^+, H^+	0,001	0,050
H^+, L^+	0,003	0,225
H^+, L^-	0,006	0,500
H^+, M^+	0,007	0,525
H^+, M^-	0,009	0,700
Σ	1,000	80,000

Po výpočtu pravděpodobností a četností jednotlivých sledů letounů je nutné stanovit hodnotu jednotkového nejkratšího času obsazení vzletové a přistávací dráhy daným druhem sledem letounů. Ten se skládá právě z průměrného času manévru letounů jednotlivých kategorií turbulence v úplavu a časového rozstupu mezi daným sledem letounů dle kategorie turbulence v úplavu. V některých případech je hodnota tohoto rozstupu rovna nule. Pro lepší přehlednost výpočtů je zde uvedena znova tabulka s průměrnými časy manévru pro danou kategorii a daný manévr a všechny čtyři obecné vzorce pro výpočet nejkratšího času obsazení vzletové a přistávací dráhy.

Tabulka 15 - Průměrný čas manévru pro danou kategorii a daný manévr

	Průměrný čas manévru pro danou kategorii a daný manévr [s]
Celý soubor	114,46
L ⁺	101,44
L ⁻	113,5
M ⁺	104,05
M ⁻	110,68
H ⁺	225,00

$$\tau_{i-j}^{++} = T_i^+ + K_{i-j}^{++}$$

$$\tau_{i-j}^{+-} = T_i^+ + T_j^-$$

$$\tau_{i-j}^{--} = K_{i-j}^{--} + T_j^-$$

$$\tau_{i-j}^{-+} = 0$$

Výpočty jednotkového nejkratšího času obsazení vzletové a přistávací dráhy:

$$\tau_{L-L}^{++} = T_L^+ = 101,44 \text{ s}$$

$$\tau_{L-L}^{+-} = T_L^+ + T_L^- = 101,44 + 113,5 = 214,94 \text{ s}$$

$$\tau_{L-L}^{--} = T_L^- = 113,5 \text{ s}$$

$$\tau_{L-L}^{-+} = 0 \text{ s}$$

$$\tau_{L-M}^{++} = T_L^+ = 101,44 \text{ s}$$

$$\tau_{L-M}^{+-} = T_L^+ + T_M^- = 101,44 + 110,68 = 212,12 \text{ s}$$

$$\tau_{L-M}^{-+} = 0 \text{ s}$$

$$\tau_{L-M}^{--} = T_M^- = 110,68 \text{ s}$$

$$\tau_{L-H}^{++} = T_L^+ = 101,44 \text{ s}$$

$$\tau_{L-H}^{-+} = 0 \text{ s}$$

$$\tau_{M-M}^{++} = T_M^+ = 104,05 \text{ s}$$

$$\tau_{M-M}^{+-} = T_M^+ + T_M^- = 104,05 + 110,68 = 214,73 \text{ s}$$

$$\tau_{M-M}^{--} = T_M^- = 110,68 \text{ s}$$

$$\tau_{M-M}^{-+} = 0 \text{ s}$$

$$\tau_{M-L}^{++} = T_M^+ + K_{M-L}^{++} = 104,05 + 180 = 284,05 \text{ s}$$

$$\tau_{M-L}^{+-} = T_M^+ + T_L^- = 104,05 + 113,5 = 217,55 \text{ s}$$

$$\tau_{M-L}^{-+} = 0 \text{ s}$$

$$\tau_{M-L}^{--} = T_L^- + K_{M-L}^{--} = 113,5 + 120 = 233,5 \text{ s}$$

$$\tau_{M-H}^{++} = T_M^+ = 104,05 \text{ s}$$

$$\tau_{M-H}^{-+} = 0 \text{ s}$$

$$\tau_{H-H}^{++} = T_H^+ = 225 \text{ s}$$

$$\tau_{H-L}^{++} = T_H^+ + K_{H-L}^{++} = 225 + 180 = 405 \text{ s}$$

$$\tau_{H-L}^{+-} = T_H^+ + T_L^- = 225 + 113,5 = 338,5 \text{ s}$$

$$\tau_{H-M}^{++} = T_H^+ + K_{H-M}^{++} = 225 + 120 = 345 \text{ s}$$

$$\tau_{H-M}^{+-} = T_H^+ + T_M^- = 225 + 110,68 = 335,68 \text{ s}$$

Výpočet hodnoty celkového času obsazení vzletové a přistávací dráhy všemi sledy letounů je obsažen v tabulce č. 16. V této tabulce lze najít všechny jednotlivé četnosti sledů letounů dle kategorie turbulence v úplavu a dle prováděného manévru. Tyto jednotlivé četnosti se vynásobí příslušným jednotkovým nejkratším časem obsazení pro daný druh sledu a manévru. Tímto vznikne hodnota nejkratšího času obsazení daným sledem letounů. Poté se jednotlivé hodnoty nejkratších časů obsazení danými sledy letounů sečtou, aby vznikl celkový nejkratší čas obsazení všemi sledy daného druhu letounů.

Tabulka 16 - Hodnota celkové času obsazení vzletové a přistávací dráhy všemi sledy letounů

1. 2.		+						-				Σ
		L		M		H		L		M		
+	L	1,013		2,363		0,225		2,250		3,150		1487,83
		101,44	102,76	101,44	239,70	101,44	22,82	201,94	454,37	212,12	668,18	
	M	2,363		5,513		0,525		5,250		7,350		4019,87
284,05		671,21	104,05	573,63	104,05	54,63	217,55	1142,14	214,73	1578,27		
	H	0,225		0,525		0,050		0,500		0,700		687,73
		405	91,13	345	181,13	225	11,25	338,5	169,25	335,68	234,98	
-	L	2,250		5,250		0,500		5,000		7,000		1342,26
		0	0,00	0	0,00	0	0,00	113,5	567,50	110,68	774,76	
	M	3,150		7,350		0,700		7,000		9,800		2719,16
0		0,00	0	0,00	0	0,00	233,5	1634,50	110,68	1084,66		
Σ		865,09		994,46		88,70		3967,75		4340,84		20513,69

Po výpočtu celkového nejkratšího času obsazení vzletové a přistávací dráhy, který je 20513,69 sekund, je nutné vypočítat hodnotu průměrného času obsazení vzletové a přistávací dráhy právě jedním letounem. Tuto hodnotu lze získat tak, že se celkový nejkratší čas obsazení vzletové a přistávací dráhy vydělí počtem všech letounů v daném souboru.

$$\overline{t_{obs}} = \frac{T_{obs}}{N} = \frac{20513,69}{80} = 256,42 \text{ s}$$

V tomto případě je hodnota průměrného času obsazení vzletové a přistávací dráhy jedním letounem rovna 256,42 sekund.

Aby bylo možné pokračovat ve výpočtu skutečné průměrné zálohy připadající na jeden letoun, je nutné stanovit hodnotu času pravidelných kontrol T_{ctrl} . Jak je již známo ze samotné kapitoly o pravidelných kontrolách, je tato hodnota proměnlivá dle kategorie letiště, ale také podle charakteru samotného letiště. Některá letiště mohou mít více drah a s tím souvisejících pojezdových drah apod. Proto je nutné brát v úvahu samotný charakter letiště. Jelikož data vzletů a přistání byla naměřena na letišti Leoše Janáčka v Ostravě, je brána do úvahy právě kategorie daného letiště. Letiště Leoše Janáčka v Ostravě je kategorie 4, tudíž je nutné provádět kontrolu dráhového systému minimálně čtyřikrát denně, přičemž doba jedné kontroly je přibližně 5 minut. Tudíž vzletová a přistávací dráha je obsazena kontrolou dráhy přibližně 20 minut denně, avšak jedná se zde o přibližnou hodnotu, která je velice proměnná a závisí jak na denní době, roční období apod. V zimních obdobích bývá kontrol zpravidla více než minimální limit kontrol čtyřikrát denně.

Výpočetní čas je v tomto případě stanoven jako 86400 sekund, což je jeden den. Proto je nutné hodnotu času pravidelné kontroly převést také na sekundy, což je 1200 sekund. Nyní lze stanovit hodnotu skutečné průměrné zálohy dle vzorce:

$$\bar{z} = \frac{T - (T_{ctrl} + T_{obs})}{N} = \frac{86400 - (1200 + 20513,69)}{80} = 808,58 \text{ s}$$

V tomto případě je hodnota skutečné průměrné zálohy připadající na jeden letoun rovna 808,58 sekund. Pro stanovení minimální časové zálohy neexistuje v letectví žádný předpis nebo tabulka, která by tuto zobecňovala, proto je nutné tuto hodnotu stanovit procentuálně z hodnoty průměrného času obsazení vzletové a přistávací dráhy jedním letounem. Hodnota této veličiny byla stanovena po konzultaci s vedoucím diplomové práce

jako jedna čtvrtina hodnoty času průměrného času obsazení vzletové a přistávací dráhy jedním letounem.

$$z_{min} = \frac{\overline{t_{obs}}}{4} = \frac{256,42}{4} = 64,11 \text{ s}$$

Hodnotu minimální časové zálohy je nutné porovnat s hodnotou skutečné průměrné zálohy připadající na jeden letoun, která musí být větší než hodnota minimální časové zálohy.

$$\bar{z} > z_{min}$$

$$808,58 > 64,11$$

Z porovnání jednotlivých záloh lze jednoznačně pozorovat, že je podmínka splněna a lze tedy přistoupit k finálnímu výpočtu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy podle vzorce:

$$C = \frac{T - T_{ctrl}}{\overline{t_{obs}} + z_{min}} = \frac{86400 - 1200}{256,42 + 64,11} = 265,81$$

V tomto případě vyšla teoretická kapacita po zaokrouhlení celkem 265 průměrných letounů za výpočetní čas 86400 sekund, což je jeden den. Hodnota minimální časové zálohy byla 64,11 sekund. Pro lepší přehlednost je hodnota teoretické kapacity stanovena na výpočetní čas jedné hodiny, tudíž 3600 sekund. V tomto případě vyšla teoretická kapacita vzletové a přistávací dráhy po zaokrouhlení 11 průměrných letounů za hodinu.

Pro srovnání jsou zde uvedeny hodnoty minimální časové zálohy a k nim náležející teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy.

Tabulka 17 - Hodnoty teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy

Hodnota z $\overline{t_{obs}}$	Hodnota z_{min} [s]	Teoretická kapacita za den	Teoretická kapacita za hodinu
25 %	64,11	265,81	11,08
20 %	51,28	276,89	11,54
15 %	38,46	288,93	12,04
10 %	25,64	302,06	12,59
5 %	12,82	316,44	13,19

Z tabulky lze jednoznačně vyčíst, že s klesající hodnou minimální časové zálohy se zvyšuje hodnota teoretické kapacity. Při hodnotě minimální časové zálohy 12,82 sekund, což je pět procent z hodnoty průměrného času obsazení vzletové a přistávací dráhy jedním letounem, je teoretická kapacita vzletové a přistávací dráhy zaokrouhleně 13 průměrných letounů za hodinu.

Pokud by hodnota minimální časové zálohy byla nula, poté hodnota teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy je 13,84 průměrných letounů za hodinu. Tudíž hodnota teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy po zaokrouhlení je stejná jak pro hodnotu minimální časové zálohy 12,82 sekund, tak pro hodnotu 0 sekund.

5 Porovnání

V této kapitole jsou porovnány výsledky výpočtu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy pomocí metody propustné výkonnosti mezistaničních úseků s výsledky dosažené v bakalářské práci – Modelování zadaného leteckého procesu, ve které byly zjišťovány provozní charakteristiky jednotlivých zkoumaných modelů. Porovnávanou provozní charakteristikou je střední doby čekání ve frontě v závislosti na intenzitě vstupního toku s výsledky teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy této práce.

V další fázi této kapitoly je experimentální výpočet teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy, který je srovnán s výsledky dosaženými v této práci.

5.1 Statistické porovnání

Statistické zpracování v bakalářské práci – Modelování zadaného leteckého procesu bylo odlišné. Prvním důvodem byl menší statistický soubor, který čítal 35 měření a také fakt, že tento soubor byl zpracován již s bezpečnostními rozstupy dle kategorie turbulence v úplavu.

Minimální hodnota času vzletového nebo přistávacího manévru s bezpečnostním rozstupem byla 67 sekund a maximální hodnota byla stanovena na 395 sekund, tudíž hodnota variačního rozpětí byla 328 sekund. Tato diplomová práce obsahuje 80 měření a byla statisticky zpracována bez časových bezpečnostních rozstupů dle kategorie turbulence v úplavu, tudíž minimální časová hodnota manévru je 64 sekund a maximální časová hodnota manévru přistávajícího nebo vzletávajícího letounu je 250 sekund. Hodnota variačního rozpětí je tudíž 186 sekund.

Z hlediska průměrného času manévru letounu se bakalářská a diplomová práce liší výrazně. V bakalářské práci byl průměrný čas manévru vypočítán jako 168,97 sekund, avšak v diplomové práci vyšla hodnota průměrného času manévru letounu jako 114,46 sekund. Tento fakt je znova dán rozsahem souboru a nezapočítáním časového bezpečnostního rozstupu již při statistickém zpracování.

Také hodnoty výběrové rozptylu jsou velice odlišné. Tato veličina popisuje, jak moc jsou hodnoty rozptýleny v daném statistickém souboru. V bakalářské práci nabývala tato veličina hodnoty 7083,03 sekund na druhou, což je několikrát více než je hodnota rozšířeného statistického souboru v diplomové práci, kde je hodnota této veličiny 1324,08 sekund na druhou. Z toho vyplývá, že hodnoty ve statistickém souboru z diplomové práce jsou mnohem méně rozptýleny.

Hodnota výběrové směrodatné odchylky se určí jako druhá odmocnina z výběrového rozptylu, tudíž i tady lze obdobný závěr jako právě u výběrového rozptylu. Obecně výběrová směrodatná odchylka vyjadřuje, jak moc jsou hodnoty statistického souboru odchýleny od jeho střední hodnoty. V bakalářské práci vyšla hodnota směrodatné výběrové odchylky 84,16 sekund a diplomové práci pro rozšířený statistický soubor vyšla tato veličina 36,39 sekund. Lze tudíž usoudit, že jednotlivé hodnoty ve statistickém souboru diplomové práce jsou mnohem méně rozptýleny od střední hodnoty, než tomu bylo u bakalářské práce a jejím statistickým souboru.

Pro lepší přehlednost jsou vypočtené statistické veličiny uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 18 - Statistické srovnání

	Bakalářská práce	Diplomová práce
Počet měření [-]	35	80
Minimální čas v_{min} [s]	67	64
Maximální čas v_{max} [s]	395	250
Variační rozpětí R [s]	328	186
Aritmetický průměr \bar{x} [s]	168,97	114,46
Výběrový rozptyl s^2 [s ²]	7083,03	1324,08
Výběrová směrodatná odchylka s [s]	84,16	36,39

5.2 Provozní charakteristiky

Pro výpočet jednotlivých provozních charakteristik v bakalářské práci byly zvoleny tři modely systému hromadné obsluhy. Systém hromadné obsluhy je každý systém, do kterého vstupují zákazníci za účelem obsluhy. Každý z těchto systému se skládá ze vstupního proudu požadavků vstupujících do systému, fronty čekajících požadavků na obsluhu v systému hromadné obsluhy, linek provádějících obsluhu a výstupního proudu požadavků. Mezi použité modely patřily M/M/1/∞, M/Es/1/∞ a M/G/1/∞.

Společnými faktory těchto tří modelů jsou:

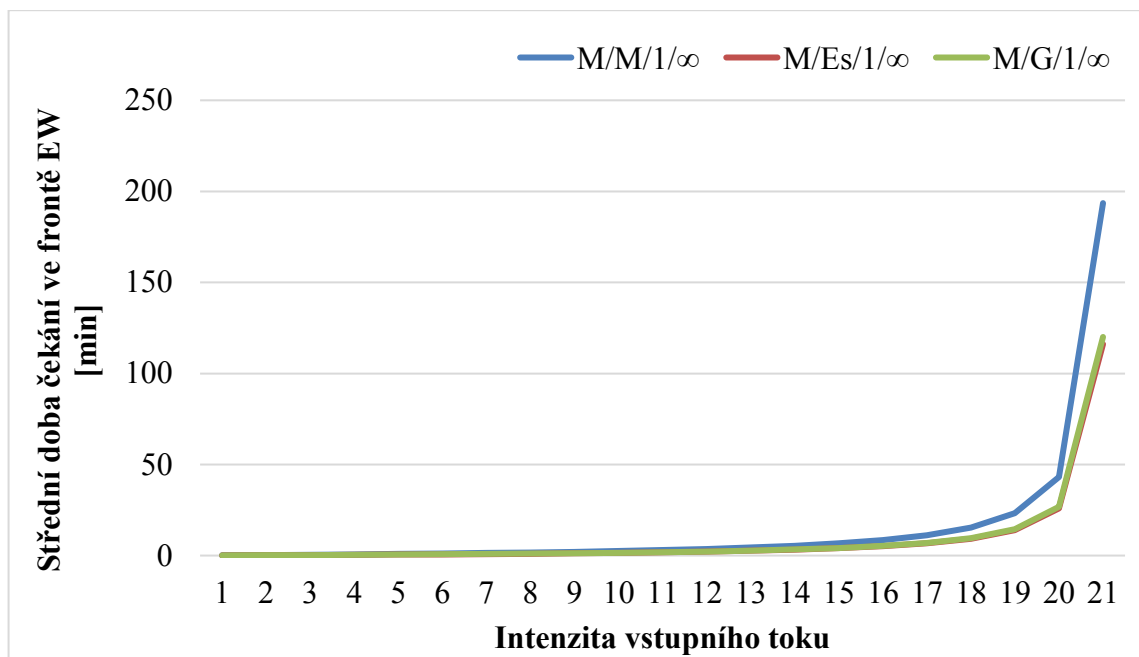
- doba mezi příchody zákazníků se bude řídit exponenciálním rozdělením (Poissonovský vstupní tok),
- systémy jsou tvořeny jednou obsluhovací linkou, kterou představuje právě jedna vzletová a přistávací dráha,
- připouští tvorbu fronty čekajících zákazníků (letounů) na obsluhu – systémy mají neomezenou kapacitu, protože neodmítají zákazníky (pravděpodobnost odmítnutí zákazníka je rovna nule).

Modely se od sebe liší podle doby obsluhy. U prvního z jmenovaných se doba obsluhy řídí exponenciálním rozdělením. Z předchozího testování bylo zjištěno, že doba obsluhy se neřídí exponenciálním rozdělením, tudíž byl tento model uveden pouze pro ukázkou (model vykazoval největší hodnoty všech provozních charakteristik, protože bral do úvahy největší rozptyl doby obsluhy – velmi krátké nebo dlouhé doby obsluhy). U druhého jmenovaného modelu se doba obsluhy řídí Erlangovým rozdělením a u posledního modelu obecným rozdělením.

Střední doba čekání ve frontě a v systému

U grafu pro střední dobu čekání ve frontě lze pozorovat, že s rostoucí intenzitou vstupního toku roste hodnota střední doby čekání ve frontě. Přibližně do hodnoty intenzity vstupního toku 13 jsou křivky všech tří modelů téměř shodné. Poté dochází k odchýlení křivky modelu $M/M/1/\infty$, kterou lze lépe pozorovat od hodnoty intenzity vstupního toku 16 a více. Tento model vykazuje nejvíce pesimistické výsledky. Zbylé modely vykazují největší růst mezi hodnotami intenzity vstupního toku 20 a 21. Přibližná střední doba čekání u zbylých dvou modelů je při intenzitě vstupního toku 20 přibližně 26,76 minut, přičemž při hodnotě vstupního toku 21 je tato doba 120,04 minut.

Graf 1 - Střední doba čekání ve frontě EW



5.3 Srovnání intenzity vstupního toku a teoretické kapacity

Hodnoty střední doby čekání ve frontě jsou velice důležité pro leteckou dopravu. Letouny čekající na přistání si nemohou dovolit čekat nepřiměřeně dlouhou dobu z důvodu omezené zásoby paliva, bezpečnosti a plynulosti dopravy. Z tohoto důvodu byly jednotlivé výsledky střední doby čekání ve frontě v bakalářské práci rozděleny do celkem šesti tříd podle intenzity vstupního toku.

Tabulka 19 - Hodnoty střední doby čekání ve frontě

Střední doba čekání ve frontě EW [min]						
Intenzita vstupního toku	$\langle 0,7 \rangle$	$\langle 7,15 \rangle$	$\langle 15,18 \rangle$	$\langle 18,19 \rangle$	$\langle 19,20 \rangle$	$\langle 20,21 \rangle$
M/M/1/∞	1,38	6,70	15,34	23,21	43,14	193,54
M/Es/1/∞	0,83	4,02	9,20	13,93	25,88	116,11
M/G/1/∞	0,86	4,18	9,57	14,48	26,92	120,78

Tabulku si lze pomyslně rozdělit na dvě části, a to na část s intenzitou vstupního toku 0 až 18 a druhou část s intenzitou vstupního toku od 18 do 21. Hodnoty intenzity vstupního toku v první části mají mnohem menší hodnotu střední doby čekání ve frontě než v druhé části, tudíž lze i tady konstatovat, že při těchto hodnotách intenzity by byl provoz na daném letišti při tomto rozsahu letecké dopravy z hlediska bezpečnosti přijatelný. Maximální střední doba čekání 9,57 minut se v této části vyskytuje u modelu M/G/1/∞.

Tuto první část tabulky pro střední dobu čekání ve frontě je možné srovnat s výsledky dosažené v této diplomové práci. Z výpočtu bylo zjištěno, že hodnota teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy se pohybuje mezi 11,08 až 13,84 letouny za hodinu podle použité hodnoty minimální zálohy. Tudiž výsledky intenzity vstupního toku v bakalářské práci a hodnoty teoretické kapacity v diplomové práci jsou si velmi podobné a lze vidět, že pokud se v metodě výpočtu propustné výkonnosti pro leteckou dopravu využije vhodná hodnota minimální zálohy, je dosaženo srovnatelných výsledků jako v bakalářské práci.

Tento fakt je dán také podobným souborem naměřených dat, z kterého čerpala bakalářské i diplomová práce. Menší odchylky ve srovnání těchto dvou prací jsou dány odlišným zpracováním, kdy v bakalářské práci je počítáno s výsledky statistického zpracování, které braly do úvahu naměřené časy plus časové rozstupy, kdežto v diplomové části je statistické zpracování souboru bez časových rozstupů.

V druhé části tabulky vycházející z bakalářské práce jsou hodnoty střední doby čekání již rizikové až nebezpečné. Zvláště při hodnotách intenzity vstupního toku 20 až 21. V tomto rozmezí je střední doba čekání ve frontě přibližně 116 až 121 minut, což je z hlediska letecké bezpečnosti nepřijatelné, aby letoun vyčkával na přistání po tuto dobu. Mohly by nastat problémy plynoucí z nedostatku paliva a shlukování intenzity čekajících letounů, které by mohly vést k nouzové situaci či katastrofě.

5.4 Experimentální výpočty

Při těchto experimentálních výpočtech jsou využity poznatky a postupy zjištěné při výpočtech teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy na naměřeném souboru dat. Pro výpočetní část jsou využity stejné vzorce pro jednotlivé veličiny, stejné průměrné časy manévru pro danou kategorii a manévr a stejné jednotkové nejkratší časy obsazení vzletové a přistávací dráhy, jež byly vypočteny pro naměřený soubor dat.

Mezi pozměněná data patří počty letounů různých kategorií za výpočetní čas, které provádí manévr vzletu nebo přistání, pravděpodobnosti a četnosti jednotlivých sledů letounů. Při změně těchto dat dojde ke změně následných veličin, a tudíž i teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy. Pro tyto experimentální výpočty zde jsou uvedeny výsledky v jednotlivých tabulkách.

Pro experimentální výpočty je zvolen celkový počet letounů 200, přičemž počet vzlétávajících a přistávajících letounů je v tomto případě vyvážený. Tohoto jevu nebylo docíleno v původním naměřeném souboru dat z důvodu rozsahu provozu na letišti Leoše Janáčka v Ostravě a z časových možností měření. Největších počtů jednotlivých letounů za výpočetní čas v těchto experimentálních výpočtech dosahují letouny kategorie medium.

Tabulka 20 - Četnosti letounů – experimentální výpočty

Typ letounů dle kategorie turbulence v úplavu	Počet letounů za výpočetní čas	
	- (vzlet)	+ (přistání)
Light	6	8
Medium	94	87
Heavy	0	5
Σ	100	100
	200	

Pomocí počtu letounů jednotlivých kategorií provádějící manévry vzletu nebo přistání jsou vypočteny pravděpodobnosti a četnosti jednotlivých sledů letounů. Tyto hodnoty jsou obsaženy v tabulce č. 21. Vzhledem k počtu jednotlivých letounů daných kategorií lze jednoduše vypočítat nejvyšší četnosti právě mezi sledy letounů kategorií medium.

Tabulka 21 - Pravděpodobnosti a četnosti jednotlivých sledů letounů – experimentální výpočty

Sledy	Pravděpodobnost	Četnost
L^+, L^+	0,0016	0,320
L^+, L^-	0,0012	0,240
L^-, L^-	0,0009	0,180
L^-, L^+	0,0012	0,240
L^+, M^+	0,0174	3,480
L^+, M^-	0,0188	3,760
L^-, M^+	0,0131	2,610
L^-, M^-	0,0141	2,820
L^+, H^+	0,0010	0,200
L^-, H^+	0,0008	0,150
M^+, M^+	0,1892	37,845
M^+, M^-	0,2045	40,890
M^-, M^-	0,2209	44,180
M^-, M^+	0,2045	40,890
M^+, L^+	0,0174	3,480
M^+, L^-	0,0131	2,610
M^-, L^+	0,0188	3,760
M^-, L^-	0,0141	2,820
M^+, H^+	0,0109	2,175
M^-, H^+	0,0118	2,350
H^+, H^+	0,0006	0,125
H^+, L^+	0,0010	0,200
H^+, L^-	0,0008	0,150
H^+, M^+	0,0109	2,175
H^+, M^-	0,0118	2,350
Σ	1,0000	80,000

Hodnoty průměrného času manévru pro danou kategorii a daný manévr zůstaly stejné jako pro výpočet teoretické kapacity na naměřeném souboru v této práci. Od tohoto se také odvíjí jednotlivé nejkratší časy obsazení vzletové a přistávací dráhy, které jsou rovněž stejné jako byly pro naměřený soubor. Také hodnoty času pravidelných kontrol a výpočetního času zůstaly stejné jako pro soubor naměřených dat.

Veličinou, kterou je nutné dále vypočítat, je celkový nejkratší čas obsazení všemi sledy daného druhu T_{obs} . Hodnota této veličiny je rovněž stanovena tabulkou, jako tomu bylo při počítání na naměřeném souboru časů. Pro tento experimentální příklad vyšla hodnota celkového nejkratšího času obsazení všemi sledy daného druhu 46664,94 sekund. Výpočetní tabulku lze nalézt v příloze č. 7 – Celkový nejkratší čas obsazení všemi sledy daného druhu – experimentální výpočty.

$$T_{obs} = 46664,94 \text{ s}$$

Hodnota této veličiny pro experimentální příklad je přibližně 2,5krát větší, než pro soubor reálných naměřených dat. Tento jev je způsoben hlavně větším počtem všech letounů.

Po výpočtu celkového nejkratšího času obsazení vzletové a přistávací dráhy je nutné vypočítat hodnotu průměrného času obsazení vzletové a přistávací dráhy právě jedním letounem. Pro experimentální příklad vyšla tato hodnota 233,32 sekund.

$$\overline{t_{obs}} = \frac{T_{obs}}{N} = \frac{46664,94}{200} = 233,32 \text{ s}$$

Při srovnání s výpočtem této veličiny na reálném souboru naměřených dat lze zjistit, že tyto hodnoty jsou velmi podobné. Pro experimentální výpočty je hodnota průměrného času obsazení vzletové a přistávací dráhy menší o 23,1 sekund. Pro lepší přehlednost je srovnání obou výše zmíněných veličin obsaženo v tabulce č. 22.

Tabulka 22 - Srovnání časů

	Naměřený soubor dat	Experimentální příklad
Celkový nejkratší čas obsazení všemi sledy daného druhu T_{obs} [s]	20513,69	46664,94
Průměrný čas obsazení vzletové a přistávací dráhy právě jedním letounem $\overline{t_{obs}}$ [s]	256,42	233,32

V dalším kroku je nutné vypočítat hodnotu skutečné průměrné zálohy \bar{z} . V tomto případě je hodnota této veličiny rovna 192,68 sekundám. Hodnoty minimální časové zálohy ani v tomto případě nelze stanovit tabulkově jako v železniční metodě, proto jsou stanoveny rovněž procentuálně z celkového nejkratšího času obsazení vzletové a přistávací dráhy jedním letounem. Procentuální poměry jsou stejné jako pro vypočtený příklad na původně naměřených datech. Ve všech případech je splněna podmínka, že hodnota skutečné průměrné zálohy je větší než hodnota minimální časové zálohy. Jednotlivé hodnoty teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy za hodinu jsou uvedeny v tabulce č. 3. V této tabulce je také srovnání výsledků dosažených v experimentální metodě s výsledky dosaženými na původním naměřeném souboru časů.

Tabulka 23 - Porovnání výsledků teoretických kapacit za hodinu

Hodnota $z_{\overline{t_{obs}}}$	Hodnota z_{min} [s]		Teoretická kapacita za hodinu	
	Naměřený soubor dat	Experimentální příklad	Naměřený soubor dat	Experimentální příklad
25 %	64,11	58,33	11,08	12,17
20 %	51,28	46,66	11,54	12,68
15 %	38,46	35,00	12,04	13,23
10 %	25,64	23,33	12,59	13,83
5 %	12,82	11,67	13,19	14,49

Z tabulky lze usoudit, že změna počtu letounů v tomto rozsahu, a tudíž pravděpodobností a četnosti sledů jednotlivých sledů letounů dle kategorie turbulence v úplavu, nemá zásadní vliv na teoretickou kapacitu vzletové a přistávací dráhy ve srovnání s teoretickou kapacitou vypočtenou pro původní naměřený soubor dat. Při nejvyšší hodnotě minimální zálohy se tyto teoretické kapacity liší po zaokrouhlení pouze o jeden průměrný letoun za hodinu ve prospěch experimentálnímu příkladu. Obdobné výsledky a rozdíly lze pozorovat při všech ostatních vypočtených hodnotách minimální zálohy. Tyto minimální rozdíly jsou dány menším počtem letounů kategorie light, protože tyto letouny vyžadují nejvyšší bezpečnostní časové rozstupy s téměř všemi ostatními letouny kategorií turbulence v úplavu. Tudíž s úbytkem letounů kategorie light klesají požadavky na minimální časové rozstupy a roste teoretická kapacita vzletové a přistávací dráhy.

Jiné hodnoty teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy lze očekávat, pokud by například na letiště přistávaly a vzlétávaly pouze letouny kategorie light a super. V tomto případě by bylo nutné počítat s největšími bezpečnostními časovými rozstupy dle kategorie turbulence v úplavu mezi menšími letouny a největším dopravním letounem A380-800 a také delšími časy vzletů a přistání právě letounu A380-800. Hodnota teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy by byla v tomto případě nižší.

6 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo modifikovat metodu výpočtu propustné výkonnosti mezistaničních úseků ve stochastických podmínkách pro potřeby výpočtu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy a na příkladech tuto upravenou metodu aplikovat.

Úvodní kapitola byla věnována popisu právě metody propustné výkonnosti v železniční dopravě. Dále byly v této kapitole stanoveny podmínky, které jsou nutné znát pro samotný výpočet a čtyři druhy nejkratšího času obsazení. Úvodní kapitola je zakončena řešeným příkladem pro lepší pochopení problematiky výpočtu propustné výkonnosti.

V pořadí druhá kapitola byla zaměřena na návrh metody pro výpočet teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy pomocí modifikace metody výpočtu propustné výkonnosti v železniční dopravě. V návrhu metody je mezistaniční úsek tvořen celou vzletovou a přistávací dráhou a v některých případech je k tomuto úseku připočten přibližovací úsek. Také v tomto případě bylo nutné rozlišit jednotlivé letouny dle kategorie turbulence v úplavu a také dle prováděného manévru. Problematika kategorií letounů dle turbulence v úplavu a rozstupů mezi nimi byla dopodrobna popsána v této kapitole. Tímto dělením vznikne celkem 64 kombinací mezi vzletávajícími a přistávajícími letouny různých kategorií.

K výpočtu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy je nutné znát právě typy letounů dle kategorie turbulence v úplavu, časové rozstupy mezi letouny dle kategorie turbulence v úplavu, jednotlivé naměřené doby vzletů a přistání typů letounů, čas pravidelných kontrol vzletové a přistávací dráhy a také výpočetní čas. Před stanovením teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy je nutné vypočítat hodnotu skutečné průměrné zálohy na jeden letoun, která musí být větší než hodnota minimální časové zálohy, aby bylo možné konstatovat, že vzletová a přistávací dráha dokáže zvládnout daný rozsah dopravy. Poslední část této kapitoly byla věnována časům pravidelných kontrol vzletové a přistávací dráhy.

Ve třetí kapitole byl statisticky zpracován soubor čítající celkem 80 naměřených časů vzletů a přistání letounů. Jednotlivé časy byly naměřeny na letišti Leoše Janáčka Ostrava a jsou brány jako sled letounů letících po sobě. V naměřeném souboru časů se vyskytovalo 29 letounů kategorie light, přičemž 20 z nich provádělo manévr vzletu a zbývajících 9 provádělo manévr přistání. Další nejpočetnější skupinu tvořily letouny

kategorie medium, kterých bylo 49. Z tohoto počtu provádělo 28 letounů manévry vzletu a zbývající této kategorie prováděly manévry přistání. Poslední skupinu tvořily letouny kategorie heavy. Tyto letouny se vyskytovaly v souboru pouze dvakrát a vždy prováděly manévry přistání. Průměrný čas manévru pro letouny všech kategorií byl 114,46 sekund. Jednalo se o čas čistě pro manévry vzletu nebo přistání, přičemž do tohoto času nebyl započítán čas bezpečnostního rozstupu mezi letouny dle turbulence kategorie v úplavu.

Ve čtvrté kapitole byla využita navržená metoda pro výpočet teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy na naměřeném souboru časů. Nejpravděpodobnějším, a tudíž i nejčtetnějším sledem dvojice typů letounů byl případ, kdy vzlétává letoun kategorie medium a po něm vzlétává následující letoun také kategorie medium. V průběhu této kapitoly byla vypočtena hodnota průměrného času obsazení vzletové a přistávací dráhy jedním letounem na 256,42 sekund. Čas pravidelných kontrol vzletové a přistávací dráhy byl stanoven na 20 minut, přičemž jedna kontrola této dráhy trvá 5 minut, avšak dle kategorie letiště je nutné tuto kontrolu provádět minimálně 4x denně.

Hodnota skutečné průměrné zálohy byla vypočtena na 808,58 sekund, přičemž hodnota minimální časové zálohy byla určena procentuálně z průměrného času obsazení vzletové a přistávací dráhy jedním letounem. Hodnota této veličiny se procentuálně pohybovala od 25% do 0%, přičemž všechny tyto hodnoty splňovaly podmínky, že hodnota skutečné průměrné zálohy je větší než hodnota minimální zálohy. V poslední fázi čtvrté kapitoly byla stanovena hodnota teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy právě v závislosti na zvolené hodnotě minimální časové zálohy. Hodnota teoretické kapacity byla 11,08 průměrných letounů za hodinu při hodnotě 64,11 sekund minimální zálohy. Maximální hodnota teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy 13,84 průměrných letounů za hodinu byla vypočtena při nulové hodnotě minimální časové zálohy.

Pátá kapitola práce byla věnována porovnání výsledků této diplomové práce s výsledky dosaženými v bakalářské práci na téma Modelování zadaného leteckého procesu, která byla zaměřena na výpočet provozních charakteristik pomocí modelů hromadné obsluhy. Statistickým srovnáním byly zjištěny rozdíly ve všech veličinách, jež byly zkoumány. Důvodem těchto rozdílů bylo, že v bakalářské práci bylo již ve statistickém zpracování počítáno s bezpečnostním časovým rozstupem dle turbulence v úplavu mezi letouny, avšak v diplomové práci byl statisticky zpracován čistě soubor s naměřenými časy bez bezpečnostních časových rozstupů. Proto například průměrný čas

manévru letounu byl v bakalářské práci stanoven na 168,97 sekund, nicméně v diplomové práci vyšla hodnota této veličiny 114,46 sekund.

Při srovnání vypočítané teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy v diplomové práci se závislostí střední doby čekání ve frontě na intenzitě vstupního toku v bakalářské práci bylo dosaženo závěru, že pokud je brána do úvahy bezpečnost letecké dopravy při vzletech a přistání, jsou výsledky obou prací velice podobné. V bakalářské práci bylo zjištěno, že intenzitě vstupního toku 0 až 18 letounů za hodinu odpovídá hodnota střední doby čekání 9,57 minut v jednom z modelů. Přičemž maximální teoretická kapacita vzletové a přistávací dráhy zjištěná v diplomové práci při nulové minimální časové zálohy je 13,84 letounů, tudíž lze konstatovat, že výsledky obou prací jsou podobné. Důvodem je podobný soubor naměřených časů vzletů a přistání jednotlivých letounů.

Poslední část srovnávací kapitoly byla věnována experimentálním výpočtům. Tyto experimentální výpočty využívaly poznatky a výpočetní vztahy z navrhované modifikované metody propustné výkonnosti. Část veličin zůstala stejná jako pro původní naměřený soubor a část byla zcela změněna kvůli rozdílnému celkovému počtu letounů, ale také kvůli rozdílnému počtu letounů v jednotlivých kategoriích. Pomocí výpočtů bylo zjištěno, že počet letounů v experimentálním příkladu, a s tím související pravděpodobnosti a četnosti jednotlivých sledů letounů, nemají zásadní vliv změnu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy ve srovnání s teoretickou kapacitou vzletové a přistávací dráhy pro původní naměřený soubor dat. Byl zjištěn minimální rozdíl v teoretické kapacitě vzletové a přistávací dráhy pouze o jeden průměrný letoun za hodinu ve prospěch právě pro experimentální příklad.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce doc. Ing. Michalovi Dordovi za cenné odborné rady a ochotu věnovat se mi v celém průběhu vypracovávání mé diplomové práce.

Dále bych také chtěl poděkovat Ing. Rostislavu Jiříčnému za pomoc při naměření dat do mé diplomové práce a Ing. Petru Friedlovi za rady a zkušenosti z oblasti řízení letového provozu.

Seznam použité literatury

Tištěné zdroje

- [1] DANĚK, Jan a Dušan TEICHMANN. *Technologie dopravy IV*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0490-5.
- [2] KELLER, Ladislav. *Učebnice pilota 2013: pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost*. Cheb: Svět křídel, 2013. ISBN 978-80-87567-26-5.
- [3] MATOUŠEK, Radek. *Modelování zadaného leteckého procesu*. Ostrava, 2017. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Doc. Ing. Michal Dorda Ph.D.
- [4] *Předpisy pro zjišťování propustnosti železničních tratí*. In: . Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1966.

Elektronické zdroje

- [5] DORDA, M. *Zpracování náhodného výběru - popisná statistika*. Kvantitativní metody organizace a řízení II [online]. [vid. 2017-01-27]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dor028/KMORII_1.pdf
- [6] OTIPKA, P., ŠMAJSTRLA, V. Statistický soubor s jedním argumentem. *PRAVDĚPODOBNOST A STATISTIKA* [online]. 5. 1. 2006 [vid. 2017-01-27]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~oti73/cdpast1/>
- [7] L14. *Letecká informační služba* [online]. [vid. 2018-09-18]. Dostupné z: <https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
- [8] L4444. *Letecká informační služba* [online]. [vid. 2018-10-08]. Dostupné z: <https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
- [9] Wake Vortex Turbulence. *Skybrary* [online]. [vid. 2018-10-08]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/Wake_Vortex_Turbulence
- [10] OSTRAVA/Mošnov. *Letecká informační služba* [online]. [cit. 2018-10-23]. Dostupné z: https://lis.rlp.cz/ais_data/aip/data/valid/a2-mt-txt1.pdf
- [11] Letiště Ostrava a.s. *Výroční zpráva 2017* [online]. [cit. 2018-10-23]. Dostupné z: http://www.airport-ostrava.cz/UserFiles/File/Vyrocní_zpravy/VZ_2017.pdf

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázky

Obrázek 1 - Jízda prvního vlaku v sudém směru a jízda následujícího vlaku v sudém směru

Obrázek 2 - Jízda prvního vlaku v sudém směru a jízda následujícího vlaku v lichém směru

Obrázek 3 - Jízda prvního vlaku v lichém směru a jízda následujícího vlaku v lichém směru

Obrázek 4 - Jízda prvního vlaku v lichém směru a jízda následujícího vlaku v sudém směru

Obrázek 5 - Příklad přistání jednoho letounu a za ním přistání dalšího letounu

Obrázek 6 - Příklad přistání jednoho letounu a za ním vzletu dalšího letounu

Obrázek 7 - Příklad vzletu jednoho letounu a za ním vzletu dalšího letounu

Obrázek 8 - Příklad vzletu jednoho letounu a za ním přistání dalšího letounu

Obrázek 9 - Určení výšky startu měření

Obrázek 10 - Určení konce měření u daného letounu

Tabulky

Tabulka 1 - Výpočet celkového nejkratšího času obsazení všemi sledy daného druhu

Tabulka 2 - Rozsah vlakové dopravy

Tabulka 3 - Pravděpodobnosti a četnosti jednotlivých sledů

Tabulka 4 - Celkový čas obsazení koleje všemi sledy vlaků

Tabulka 5 - Časové rozstupy mezi přistávajícími letouny

Tabulka 6 - Časové rozstupy mezi vzlétávajícími letouny

Tabulka 7 - Rozstupy mezi letouny založené na vzdálenosti

Tabulka 8 - Hodnota celkového času obsazení všemi sledy letounů daného druhu

Tabulka 9 - Četnosti letounů

Tabulka 10 - Variační rozpětí

Tabulka 11 - Aritmetický průměr naměřených časů

Tabulka 12 - Výběrový rozptyl

Tabulka 13 - Výběrová směrodatná odchylka

Tabulka 14 - Pravděpodobnosti a četnosti jednotlivých sledů letounů

Tabulka 15 - Průměrný čas manévru pro danou kategorii a daný manévr

Tabulka 16 - Hodnota celkové času obsazení vzletové a přistávací dráhy všemi sledy letounů

Tabulka 17 - Hodnoty teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy

Tabulka 18 - Statistické srovnání

Tabulka 19 - Hodnoty střední doby čekání ve frontě

Tabulka 20 - Četnosti letounů – experimentální výpočty

Tabulka 21 - Pravděpodobnosti a četnosti jednotlivých sledů letounů – experimentální výpočty

Tabulka 22 - Srovnání časů

Tabulka 23 - Porovnání výsledků teoretických kapacit za hodinu

Grafy

Graf 1 - Střední doba čekání ve frontě EW